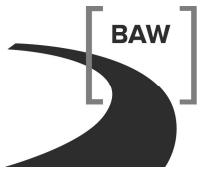


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Untersuchung des Strombaus und des Se-
dimentmanagements im Rahmen des
"Tideelbekonzeptes"**

Abschlussbericht

A3955 03 10172-6



Untersuchung des Strombaus und des Sedimentmanagements im Rahmen des "Tideelbekonzeptes"

Abschlussbericht

Auftraggeber: Hamburg Port Authority
Neuer Wandrahm 4
20457 Hamburg

Auftrag vom: 11.08.2009, Az.: 663 / 09F

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A3955 **03 10172-6**

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme II (K3)
Bearbeiter: Dipl.-Ing. M. Klöpper
Dipl.-Ozeanogr. Marcus Boehlich

Hamburg, Oktober 2014

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Zusammenfassung

Das Konzept zur nachhaltigen Entwicklung der Tideelbe als Lebensader der Metropolregion Hamburg sieht unter anderem die Schaffung zusätzlichen Tidevolumens zwischen Glückstadt und Geesthacht vor. Im Auftrag der Hamburg Port Authority untersucht die BAW den Anschluss verschiedener Flächen an die Tideelbe. Das Ziel solcher Maßnahmen liegt in der Reduktion des Tidehubs und der Dämpfung des stromauf gerichteten Sedimenttransports in der Tideelbe. Die Studie wird mit Hilfe eines 3D-Elbe-Simulationsmodells der BAW (UNTRIM/SediMorph) unter Berücksichtigung der Salz- und Sedimentdynamik durchgeführt. Untersucht werden 22 Varianten zum Anschluss von Flutraum in den Bereichen Neuland, Hamburg-Billbrook, Spadenland, und Alte Süderelbe. Die Ergebnisse werden in fünf Einzelberichten detailliert beschrieben. Dieser Abschlussbericht stellt eine zusammenfassende Darstellung und Bewertung der durchgeführten Untersuchungen dar.

Die Wirkung von zusätzlichem Flutraum auf die Hydrodynamik der Tideelbe ist hauptsächlich von drei Faktoren abhängig: Der Größe des Flutraums, der Lage des Flutraums und dem Fließquerschnitt insbesondere im Anschlussbereich der Fluträume. Der Anschluss eines Flutraums im Hamburger Raum ist, bezogen auf die Reduktion des Tidehubes besonders effektiv. Die Wirkung des Flutraums ist in diesem Fall besonders groß und tritt in besonders günstigen Bereichen innerhalb der Tideelbe auf. Neben der großräumigen Lage des Flutraumes spielt vor allem die Größe des angeschlossenen Tidevolumens eine zentrale Rolle. Je größer das angeschlossene Tidevolumen ist, desto größer ist auch die Wirkung der Maßnahme auf die Tideelbe. Werden mehrere Fluträume gleichzeitig angeschlossen, wird insgesamt mehr Tidevolumen angeschlossen. Die Wirkung eines Flutraums kann durch einen zu kleinen Fließquerschnitt innerhalb oder im Anschlussbereich des Flutraums an die Elbe gedämpft werden. Ebenso kann ein zu großer Fließquerschnitt die Strömungsverhältnisse ungünstig beeinflussen. Aus Systemstudien im Rahmen des Projekts wird deutlich, dass ein großer Fließquerschnitt im Anschlussbereich des Flutraums, durch eine ungünstige zeitliche und räumliche Veränderung der Strömungsverhältnisse, zu einem lokal Anstieg des Verhältnisses der Flut- zur Ebbstromgeschwindigkeit in der Tideelbe führen kann. Weitere Effekte wie die Sohlrauheit und der Fließweg innerhalb eines Flutraumes, Oberwassersituationen oder Wehrsteuerungen spielen gegenüber den drei oben genannten Faktoren hinsichtlich der Wirkung von zusätzlichem Flutraum nur eine untergeordnete Rolle.

Alle untersuchten Varianten zum Anschluss von Flutraum im Hamburger Raum sind geeignet eine Tidehubreduktion in der Elbe und einer Abnahme des stromauf gerichteten Netto-Schwebstofftransports zu erreichen. Durch den Anschluss von zusätzlichem Flutraum wird der Tidewelle Energie entzogen. Die Amplitude der Tidewelle bzw. der Tidehub in der Elbe nimmt ab. Die Tidehubreduktion findet auf einer Strecke von mindestens 100 Flusskilometern statt. Je nach Variante nimmt der Tidehub um 1 cm bis 10 cm ab. Das Tideniedrigwasser wird dabei vor allem im Hamburger Raum angehoben.

Neben dem Tidehub werden durch den zusätzlichen Flutraum auch die Strömungsverhältnisse im Ästuar verändert. Durch den Anschluss von Flutraum wird das Tidevolumen des Ästuars bei konstanter Dauer der Tide vergrößert. Stromab des Flutraums steigt dadurch die Strömungsgeschwindigkeit. Dem gegenüber steht die Reduktion des Tidehubs. Ein geringerer Tidehub reduziert das Tidevolumen. Diese Reduktion des Tidevolumens nimmt mit steigendem räumlichem Abstand vom angeschlossenen Flutraum in Richtung stromab zu. Eine Abnahme des Tidevolumens bewirkt eine Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit. Diese beiden Effekte überlagern sich im Ästuar. Nahe dem angeschlossenen Flutraum überwiegt der Anstieg des Tidevolumens durch den Anschluss des Flutraums. Direkt stromab des Flutraums steigt die Strömungsgeschwindigkeit daher um bis zu ca. 0,2 m/s an. Je weiter man sich stromab des Flutraumes befindet, desto stärker wirkt die Abnahme des Tidevolumens infolge der Tidehubreduktion. Daher sinkt die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmendem räumlichem Abstand vom angeschlossenen Flutraum Richtung stromab. Wenn die Abnahme des Tidevolumens (durch die Reduktion des Tidehubs) gegenüber der Zunahme des Tidevolumens (infolge des angeschlossenen Flutraums) überwiegt, tritt eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit auf. Dies ist spätestens 80 km stromab der angeschlossenen Fluträume der Fall. Stromauf des angeschlossenen Flutraums sinkt das Tidevolumen durch die Tidehubreduktion. Dadurch sinkt die Strömungsgeschwindigkeit stromauf des angeschlossenen Flutraums um bis zu ca. 0,1 m/s.

Die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit fördert die Mobilisierung und den Transport von Sedimenten. Trotz des höheren Sedimenttransports im Flut- und Ebbestrom sinkt der Netto-Schwebstofftransporte zwischen der Trübungszone (ca. Elbe-Km 675) und Hamburg.

Der Anschluss von Flutraum im Hamburger Raum beeinflusst den Salzgehalt in der Brackwasserzone der Elbe. Die Änderung des maximalen Salzgehalts liegt nur vereinzelt oberhalb eines sinnvollen, messtechnisch auch zu erfassenden Schwellenwertes von 0,1. Das Salz wird weniger weit in das Ästuar hinein transportiert. Zwischen Elbe-Km 660 (Grauerort) und Elbe-Km 710 (Otterndorf) sinkt der maximale Salzgehalt um bis zu 0,2. In der Elbmündung (stromab Elbe-Km 710) steigt der maximale Salzgehalt um bis zu 0,1.

	Inhaltsverzeichnis	Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	1
3	Wirkzusammenhänge beim Anschluss von Flutraum an Tideästuaren	2
4	Bearbeitungskonzept	4
4.1	Allgemeines	4
4.2	Mathematisches Simulationsverfahren	5
4.3	Analyse und Bewertung der Modellergebnisse	7
5	Untersuchungsumfang	8
6	Ergebnisse	15
6.1	Einfluss des Ortes des Flutraums	15
6.2	Einfluss der Größe des Flutraums	18
6.3	Einfluss des Querschnitts im Anschlussbereich	19
6.4	Weitere Aspekte zum Anschluss zusätzlichen Flutraums	20
6.4.1	Kombination von Maßnahmen	20
6.4.2	Einfluss des Oberwassers	22
6.4.3	Einfluss der Rauheit innerhalb des Flutraums	25
6.4.4	Wehrsteuerung	27
6.5	Ergebnisübersicht aller Varianten der untersuchten Maßnahmen	27
6.6	Studie zur Wirkung der Maßnahme Neue Alte Süderelbe	33
7	Bewertung	39

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Schematische Darstellung des Bearbeitungskonzepts.	5
Bild 2: Modellgebiet des HN-Modells der Tideelbe.	6
Bild 3: Verwendete Längs- und Querprofile in der Elbe.	8
Bild 4: Ausschnitt der Modelltopographie der Maßnahme Kiesteich.	11
Bild 5: Ausschnitt der Modelltopographie der Maßnahme Neuland.	11
Bild 6: Ausschnitt der Modelltopographie der Maßnahmen Kreetsand / Spadenlander Busch und Spadenlander Ausschlag.	12
Bild 7: Ausschnitt der Modelltopographie der Maßnahme Alte Süderelbe.	13
Bild 8: Ausschnitt der Modelltopographie der Maßnahme Neue Alte Süderelbe.	14
Bild 9: Systemstudie zur Lage des Flutraums.	17
Bild 10: Tidehubreduktion der beiden Varianten der Maßnahme Neuland.	18
Bild 11: Differenz des mittleren Tidehubs (Varianten KT2 und KT4).	19
Bild 12: Systemstudie zum Querschnitt im Anschlussbereich eines Flutraums.	20
Bild 13: Wirkung der Varianten (NL2, KT4 und NLKT1) auf den MThb, die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten und den Netto-Schwebstofftransport auf dem Längsprofil.	21
Bild 14: MThb, MTmw und MTnw bei einem konstanten Oberwasser von 350 m ³ /s (NLKT1) und von 1500 m ³ /s (NLKT2) auf dem Längsprofil.	23
Bild 15: Wirkung auf ausgewählte Analysegrößen bei einem konstanten Oberwasser von 350 m ³ /s (NLKT1) und 1500 m ³ /s (NLKT2) auf dem Längsprofil.	24
Bild 16: Netto-Schwebstofftransport im PIZ bei konstantem Oberwasser von 350 m ³ /s und 1500 m ³ /s auf dem Längsprofil.	25
Bild 17: Systemstudie zum Einfluss der Sohlrauheit innerhalb des Flutraums der Maßnahme Kiesteich (KT4).	26
Bild 18: Wirkung der Maßnahme Neue Alte Süderelbe auf die Wasserstände und die maximale Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit auf dem Längsprofil.	35
Bild 19: Wirkung der Maßnahme Neue Alte Süderelbe auf das maximale F:E Verhältnis, den maximalen Salzgehalt und den Netto- Schwebstofftransport auf dem Längsprofil.	36

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1: Im Rahmen des Projekts erstellte Berichte.	2
Tabelle 2: Schwellenwerte der Tidekennwerte für ausbaubedingten Änderungen.	8
Tabelle 3: Tabellarische Übersicht des Untersuchungsumfangs.	10
Tabelle 4: Kenngrößen des Abfluss am Pegel Neu Darchau [15].	22
Tabelle 5: Tabellarische Übersicht der maximalen Wirkung der Maßnahmen auf die Wasserstände.	29
Tabelle 6: Tabellarische Übersicht der Wirkung der Maßnahmen auf die maximale Strömungsgeschwindigkeit.	30
Tabelle 7: Tabellarische Übersicht der Wirkung der Maßnahmen auf den Netto-Schwebstofftransport.	31
Tabelle 8: Tabellarische Übersicht der Wirkung der Maßnahmen auf den maximalen Salzgehalt in der Elbe.	32
Tabelle 9: Größter Wert der maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit innerhalb der Maßnahme Neue Alte Süderelbe.	37

Abkürzungsverzeichnis

AZ	Ausbauzustand
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
F:E	Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit
HPA	Hamburg Port Authority
MThw	mittleres Tidehochwasser
MTnw	mittleres Tideniedrigwasser
MThb	mittlerer Tidehub
MTmw	mittleres Tidemittelwasser
PIZ	Planerischer Ist-Zustand

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Historische Entwicklungen und neue Anforderungen im Küstenschutz veränderten das Landschaftsbild und die hydraulischen Verhältnisse der Tideelbe in der Vergangenheit nachhaltig. Hierbei spielten beispielsweise Maßnahmen wie die Fahrinnenanpassungen, der Deichbau, Hafenumstrukturierungen, Uferschutzmaßnahmen und die Landgewinnung eine Rolle. Das hydraulische System der Tideelbe hat sich an die daraus resultierenden, veränderten Umweltbedingungen angepasst. So hat sich beispielsweise der mittlere Tidehub (MThb) im Hamburger Hafen (St. Pauli) gegenüber dem historischen Wert von 2 Metern (Anfang des 20. Jahrhunderts) knapp verdoppelt. Gleichzeitig hat sich der stromauf gerichtete Schwebstofftransport verstärkt. Insbesondere Feinsedimente werden dadurch immer wieder von Unterstrom in den Hafen eingetragen, so dass dort mehr gebaggert werden muss. Auch aus naturschutzfachlicher Sicht stellt sich vor allem die Verlandung der Seitenbereiche der Elbe als nachteilig dar.

Mit einem Konzept zur nachhaltigen Entwicklung der Tideelbe [1] verfolgen die Hamburg Port Authority und die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes das Ziel, den o. g. Entwicklungen langfristig entgegenzuwirken.

Unter anderem sieht das Konzept die Schaffung zusätzlichen Tidevolumens¹ zwischen Glückstadt und Geesthacht vor. Studien der BAW [2–4] zeigen, dass sich zusätzlicher Flutraum im Stromspaltungsgebiet der Tideelbe dämpfend auf den Tidehub auswirkt. Die Hamburg Port Authority hat verschiedene Flächen im Raum Hamburg benannt, auf denen Maßnahmen zur Schaffung von Flutraum denkbar sind. Im Rahmen der Untersuchung wird die Wirkung der Maßnahmen auf die Hydrodynamik und den Sedimenttransport der Tideelbe ermittelt. Für die verschiedenen Maßnahmen werden dabei mehrere Ausführungsvarianten betrachtet. Das Ziel der Maßnahmen liegt in der Reduktion des Tidehubs und der Dämpfung des stromauf gerichteten Sedimenttransports.

Die Ergebnisse der untersuchten Maßnahmen im Rahmen des Projekts werden in fünf Einzelberichten detailliert beschrieben. Dieser Abschlussbericht stellt eine zusammenfassende Darstellung und Bewertung sämtlicher Untersuchungen dar.

2 Unterlagen und Daten

Zur Erstellung der Modelltopographie werden Bathymetriedaten der HPA im Bereich der Maßnahmen verwendet. Geplante Baumaßnahmen werden aus Zeichnungen in den Refe-

¹ Wasservolumen zwischen dem Tidehoch- und Tideniedrigwasser

renzzustand der Modelltopographie (Planerischer Ist-Zustand) übernommen. Eine detaillierte Auflistung der verwendeten Unterlagen und Daten kann [5] entnommen werden.

Im Rahmen des Projekts werden verschiedene Einzelberichte erstellt. Sie enthalten detaillierte Beschreibungen der Varianten einzelner Maßnahmen, des Bearbeitungskonzepts und der Modellkalibrierung. Alle im Rahmen des Projekts erstellten Berichte sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Maßnahmen	Anschluss bei Elbe-Km	Fläche [km ²]	Volumen* [Mio. m ³]	Anzahl betrachteter Varianten	Nr. des Berichts
Bearbeitungskonzept					A39550310172-1
Einzelmaßnahme Neuland	613	0,9 bis 2,6	3,1 bis 7,8	2	A39550310172-2
Einzelmaßnahme Kiesteich	618	0,7 bis 2,1	2,0 bis 7,3	3	
Einzelmaßnahme Kiesteich (geringerer Anschlussquerschnitt)	618	2,1	2,1	1	A39550310172-3
Komplex Spadenland	Kreetsand Sp. Ausschlag	614	0,3	0,8	1
	Kombination	615	0,4	1,5	2
		614 bis 615	0,7	2,3	2
Alte Süderelbe		628 bis 635	1,1 bis 1,6	4,9 bis 5,3	A39550310172-5
Abschlussbericht					A39550310172-6

* angeschlossenes Tidevolumen (Wasservolumen zwischen MTnw und MThw)

Tabelle 1: Im Rahmen des Projekts erstellte Berichte.

3 Wirkzusammenhänge beim Anschluss von Flutraum an Tideästuaren

Tideästuare sind komplexe natürliche Systeme im Küstenbereich, die das Verbindungsstück zwischen dem vom Abfluss geprägten Binnenfluss und der von Gezeiten und Wind geprägten offenen See darstellen. Die charakteristischen physikalischen Eigenschaften des Tidegewässers sind:

- die periodisch wechselnden Wasserstände (Gezeiten) verbunden mit periodischem Trockenfallen der Wattflächen,
- die tidephasenabhängig alternierende Richtung und Intensität der Strömung und
- der starke Salzgradient (Brackwasserzone) verbunden mit barokliner Zirkulation.

Das hydrodynamische System des Ästuars kann durch wasserbauliche Maßnahmen beeinflusst werden. Dabei ist es erforderlich die Prozesse des Systems zu kennen um die Wirkung einer wasserbaulichen Maßnahme vorhersagen zu können.

Die durch die Gezeitenkräfte hervorgerufene Tidewelle wandert vom Atlantik, durch die Nordsee und weiter durch die Elbmündung hinauf bis zur Tidegrenze am Wehr Geesthacht. Dabei unterliegt sie einer Reihe von Einflüssen, die zu einer Veränderung der Form und Intensität der Tidewelle führen. Beispielsweise variiert die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit nach [6] im Tideverlauf zeitlich. Durch die geringere Wassertiefe unter dem Wellental schreitet der Berg der Tidewelle schneller fort als das Wellental. Außerdem führt die zeitlich varie-

rende Wassertiefe zu einer zeitlichen Variation der Energiedissipation. Diese Prozesse erzeugen eine Asymmetrie der Tidekurve, die sich durch einen steileren Flut- und flacheren Ebbeast auszeichnet. Wie [7] zeigt, nimmt die Asymmetrie der Tidekurve der Elbe auf ihrem Weg von der Nordsee nach Oberstrom zu. Hierbei spielen auch der nach Oberstrom zunehmende Einfluss des Oberwassers sowie die Breitenkonvergenz eine Rolle. Trotz der fortlaufenden Dämpfung der Tidewelle infolge von Energieverlusten durch Reibung an der Sohle und den Ufern steigt die Gezeitenamplitude Richtung Oberstrom an. Dies ist nach [7] auf die Reflexion der Tidewelle an der Gewässertopographie und dem Wehr Geesthacht zurückzuführen. Unterhalb eines reflektierenden Querschnitts setzt sich die resultierende Tidewelle aus den Anteilen der einlaufenden und reflektierten Tidewelle zusammen. Durch die Überlagerung zweier gegenläufiger Wellen erhöht sich nach [8] die Tideamplitude und verschieben sich die Kenterpunkte der Tideströmung in Bezug auf das Tidehoch- und Tideniedrigwasser. Die Verringerung der Gewässerbreite Richtung Oberstrom trägt ebenfalls zu einem Anstieg des Tidehubs bei, da sich die eingetragene Energie auf einen kleineren Querschnitt konzentriert. Die Reflexions- und Dämpfungseigenschaften eines Ästuars sind also durch seine Hydromorphologie geprägt. In seitlichen Abzweigen eines Ästuars wie beispielsweise Nebenflüssen, Hafenbecken oder Altarmen wird ein Teil der Tideenergie reflektiert, ein anderer Teil wird beim Füllen und Leeren der Becken dissipiert. Dadurch wird der Tidewelle Energie entzogen und der Tidehub gedämpft. Dieser Effekt kommt auch beim hier untersuchten Anschluss von zusätzlichem Flutraum zum Tragen. Neben dem Tidehub werden dabei auch die Strömungsverhältnisse im Ästuar verändert, was sich wiederum auf die advektiven Transportprozesse auswirkt. Die Strömungsgeschwindigkeit steigt stromab eines angeschlossenen Flutraums, da das Tidevolumen in diesem Bereich durch den zusätzlichen Flutraum steigt, gleichzeitig die Dauer einer astronomischen Tide aber konstant ist. Dem gegenüber steht die Reduktion des Tidehubs. Ein geringerer Tidehub reduziert das Tidevolumen. Diese Reduktion des Tidevolumens nimmt mit steigendem räumlichen Abstand vom angeschlossenen Flutraum in Richtung stromab zu. Eine Abnahme des Tidevolumens bewirkt eine Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit. Diese beiden Effekte überlagern sich im Ästuar. Nahe dem angeschlossenen Flutraum überwiegt der Anstieg des Tidevolumens durch den Anschluss des Flutraums. Direkt stromab des Flutraums steigt die Strömungsgeschwindigkeit daher an. Je weiter man sich stromab des Flutraumes befindet, desto stärker wirkt die Abnahme des Tidevolumens infolge der Tidehubreduktion. Daher sinkt die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmendem räumlichem Abstand vom angeschlossenen Flutraum Richtung stromab. Wenn die Abnahme des Tidevolumens (durch die Reduktion des Tidehubs) gegenüber der Zunahme des Tidevolumens (infolge des angeschlossenen Flutraums) überwiegt, tritt eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit auf. Stromauf des angeschlossenen Flutraums sinkt das Tidevolumen durch die Tidehubreduktion. Dadurch sinkt die Strömungsgeschwindigkeit stromauf des angeschlossenen Flutraums. Die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit führt zu einer verstärkten Mobilisierung von Sedimenten, was zu einer verstärkten, gezeiteninduzierten Materialumverteilung innerhalb des Systems führt. Hinsichtlich der Bewertung der Maßnahme ist dabei weniger relevant wie

stark sich die Materialumverteilung erhöht, als vielmehr wie stark und in welche Richtung sich der Netto-Schwebstofftransport verschiebt.

Die Wirkung eines neu geschaffenen Flutraums wird im Wesentlichen durch drei Faktoren beeinflusst:

- Lage des Flutraums
- Größe des Flutraums
- Anschlussquerschnitt des Flutraums

Zusätzlich spielen weitere Faktoren wie z.B. die Geometrie und Bathymetrie (verfügbarer Fließquerschnitt, Tiefe, ...) und die Sohlrauheit innerhalb des angeschlossenen Flutraums eine Rolle.

4 Bearbeitungskonzept

4.1 Allgemeines

Der Anschluss zusätzlicher Flächen an das Elbe-Ästuar erhöht das zur Verfügung stehende Tidevolumen im Raum Hamburg. Dies wirkt sich durch ein verändertes Reflexions- und Dämpfungsverhalten auf die Form der von der Nordsee einlaufenden Tidewelle aus. Verglichen mit dem freien Ozean ist in flachen Küstengewässern und Ästuaren der Tidehub im Verhältnis zur Wassertiefe groß. Die unterschiedliche Wassertiefe unter dem Wellenberg und dem Wellental einer Tidewelle beeinflusst die tiefenabhängige Fortschrittsgeschwindigkeit. Aufgrund der unterschiedlichen Fortschrittsgeschwindigkeit unter dem Wellenberg und dem Wellental bildet sich eine Asymmetrie der Tidekurve in Form eines steilen Flutasts und flacheren Ebbeasts aus. Die Verformung der Tidewelle führt zu einer Veränderung der Tidekennwerte des Ästuars (z.B. Tidehoch-, Tideniedrigwasser, Tidehub, Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit). Die Prognose dieser Veränderungen nach Stand der Technik und Wissenschaft erfolgt durch eine wasserbauliche Systemanalyse unter Einsatz einer dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellierung. Um die vorhabensbedingten Änderungen durch die an die Elbe angeschlossenen Maßnahmen aus den Simulationsergebnissen herauslesen und untereinander vergleichen zu können, erfolgte jeweils eine Simulation mit Berücksichtigung der jeweiligen Eingriffe (Ausbauzustände, AZ) und ohne Berücksichtigung der Eingriffe (Planerischer Ist-Zustand, PIZ). Die Differenz der Simulationsergebnisse (AZ-PIZ) entspricht den vorhabensbedingten Änderungen, bzw. der Wirkung der Maßnahmen. Schematisch ist das Vorgehen in Bild 1 dargestellt.

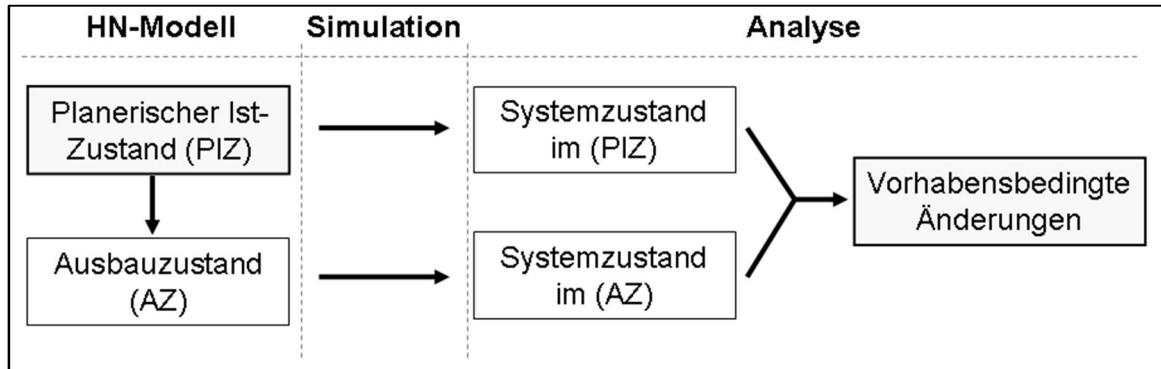


Bild 1: Schematische Darstellung des Bearbeitungskonzepts.

4.2 Mathematisches Simulationsverfahren

Die Simulationen der wasserbaulichen Systemanalyse der Tideelbe werden mit dem dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellverfahren UNTRIM-3D gekoppelt mit dem Morphologie-Modul SediMorph [9] durchgeführt. UNTRIM-3D ist ein Finite-Volumen-Verfahren für unstrukturierte Gitter zur Simulation stationärer und instationärer Strömungs- und Transportprozesse in Gewässern mit freier Wasseroberfläche. Eine detaillierte Beschreibung des von Prof. Vincenzo Casulli an der Universität Trient, Italien entwickelten Verfahrens wird auf den Internet-Seiten der BAW-DH [10] gegeben. Dort sind auch die zur Berechnung der Hydrodynamik und des Transports gelöster Stoffe berücksichtigten physikalischen Prozesse aufgeführt. Die Projektbearbeitung findet mit den Modellversionen „untrim2004“ und deren Weiterentwicklung „untrim2007“ statt. Um die Bearbeitung des Projekts nach dem Stand der Technik gewährleisten zu können, erfolgt innerhalb des Projektes eine Aktualisierung der Modellversion statt. Dies ist der langen Projektlaufzeit (5 Jahre) geschuldet.

Berechnungsergebnisse

Durch das mathematische Modell werden u.a. die Berechnungsergebnisse der Wasserspiegelauslenkung, der Strömungsgeschwindigkeit, der Substanzkonzentrationen (z.B. Salzgehalt, Temperatur, Schwebstoffgehalt) und des hydrodynamischen Drucks an den diskreten Berechnungsknoten geliefert. Details zum Modellverfahren sind im [11] aufgeführt.

Nachweis der Modellgüte

Im Rahmen einer Kalibrierung wird die Naturähnlichkeit des Modells nachgewiesen. Beide Modellversionen sind in der Lage die wesentlichen Prozesse der Hydrodynamik in der Tideelbe abzubilden. Gemessene physikalische Größen wie der Wasserstand, die Strömungsgeschwindigkeit, der Salzgehalt und die Schwebstoffkonzentration können von beiden Modellen gut reproduziert werden. In [5] (untrim2004) und [12] (untrim2007) wird die Qualität der verwendeten Modelle detailliert beschrieben.

Modellgebiet und Auflösung

Das Modellgebiet (Bild 2) des verwendeten HN-Modells erstreckt sich vom Wehr bei Geesthacht bis zur Nordsee. Neben der Elbe selbst sind in dem Modellgitter auch die großen Nebenflüsse enthalten. Als Modellgitter wird ein unregelmäßiges Dreieck- und Vierecksgitter verwendet. Dies ermöglicht eine auf die Topographie angepasste Auflösung des Modellgitters. Das Gebiet wird in der Fläche durch rund 155 000 Gitterzellen aufgelöst, wobei die häufigsten Kantenlängen im Bereich von 20 bis 80 m liegen. Alle Simulationen werden mit einer vertikalen Auflösung von einem Meter gerechnet. Das Modellgitter zwischen den Ausbauzuständen und dem Planerischen Ist-Zustand ist stets identisch, so dass Differenzen aufgrund unterschiedlicher Diskretisierungen ausgeschlossen werden können.

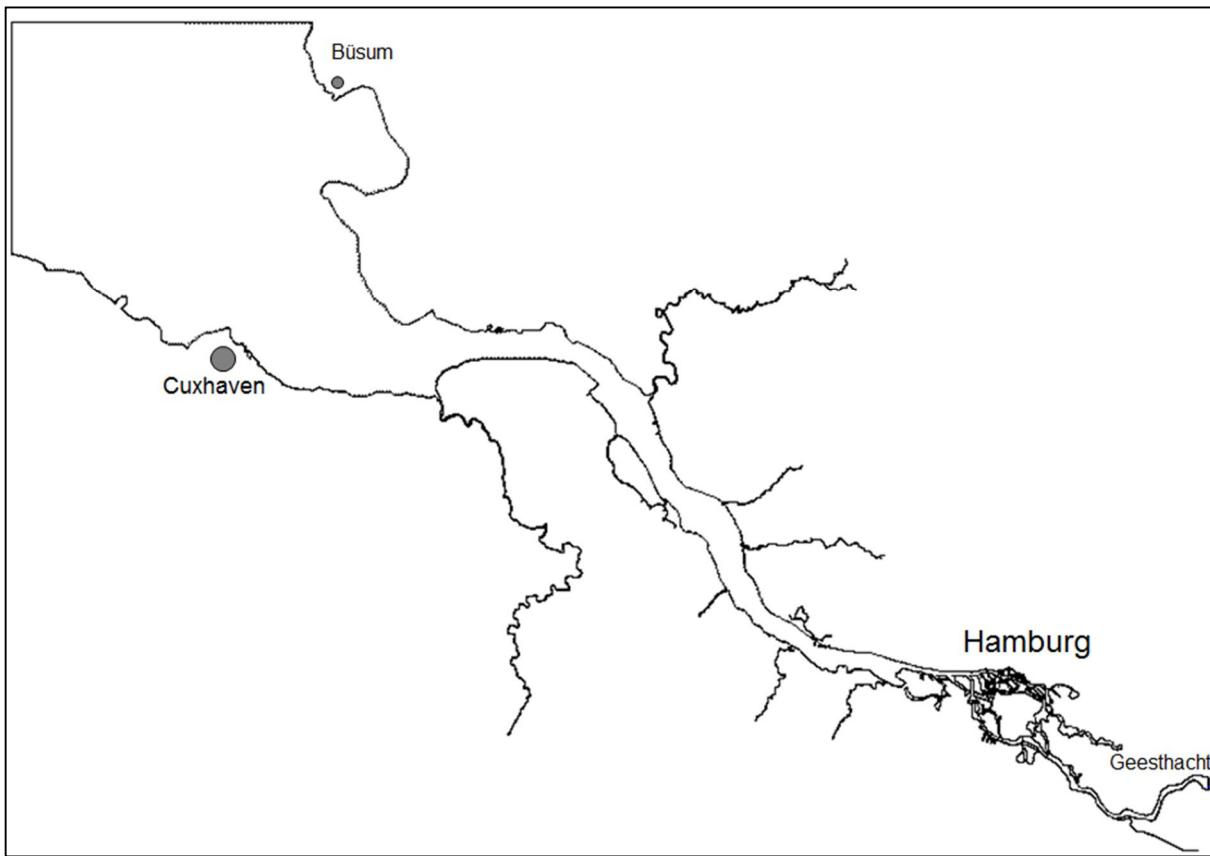


Bild 2: Modellgebiet des HN-Modells der Tideelbe.

Modelltopographie

In der Modellversion „untrim2004“ wird eine Topographie basierend auf Befliegungsdaten des Jahres 2006 verwendet. Die Topographie des Modells der Version „untrim2007“ basiert auf Befliegungsdaten des Jahres 2010.

In allen Rechnungen werden geplante Maßnahmen wie die Anpassung der Fahrrinne sowie verschiedenen Hafenplanungen berücksichtigt. Diese werden in [5] detailliert aufgeführt.

Modellsteuerung

Die Steuerung des Modells erfolgt über die Vorgabe von Randwerten. Am seeseitigen Rand werden die Wasserstände des Simulationszeitraumes eingesteuert. Am Wehr Geesthacht wird das Oberwasser durch die direkte Vorgabe des Zuflusses (Dirichlet-Randbedingung) angegeben. Bei den im Vorfeld dieses Projektes durchgeführten Untersuchungen der BAW zum Mittel- und langfristigen Strombaukonzept für die Tideelbe [3, 4] wurde ein Simulationszeitraum im Mai 2002 verwendet. Auf diesen Untersuchungen aufzubauen, liegt der Simulationszeitraum der Rechnungen mit „untrim2004“ ebenfalls im Mai 2002. Die Simulationen mit „untrim2007“ werden mit Randwerten aus dem Jahr 2010 (passend zur den Topographiedaten) gesteuert.

Zu Beginn einer jeden Simulation wird innerhalb des Modellgebiets ein Anfangszustand (Systemzustand bezüglich Wasserstand, Salzgehalt, Strömungsgeschwindigkeit, u.a. zu Beginn einer Simulation) vorgegeben um das Einschwingen des Modells (Erreichen eines naturähnlichen Zustandes, z.B. der Salzgehaltsverteilung) zu gewährleisten. Die Anfangszustände und die Modellsteuerung werden in [5] und [12] detailliert beschrieben.

4.3 Analyse und Bewertung der Modellergebnisse

Ergebnisanalyse

Bei den Ergebnisdateien des numerischen Modells handelt es sich um sehr große synoptische Datensätze. Mit Hilfe BAW eigener Analyseverfahren (Langzeit- und Tidekennwertanalyse) werden die Modellergebnisse weitergehend analysiert. Die Analyseverfahren und Parameter sind auf den Internetseiten der BAW [10] ausführlich dokumentiert.

Die Analyse erfolgt sowohl über die Fläche als auch auf ausgewählten Profilen durch die Elbe. Die verwendeten Profile sind in Bild 3 dargestellt.

Die jeweiligen Analysen erstrecken sich immer über einen Spring-Nipp-Zeitraum. Die folgenden Analysezeiträume werden verwendet:

Analysezeitraum 2002: 11.05.2002 16:40 Uhr bis 25.05.2002 23:30 Uhr

Analysezeitraum 2010: 14.07.2010 17:30 Uhr bis 29.07.2010 00:00 Uhr.

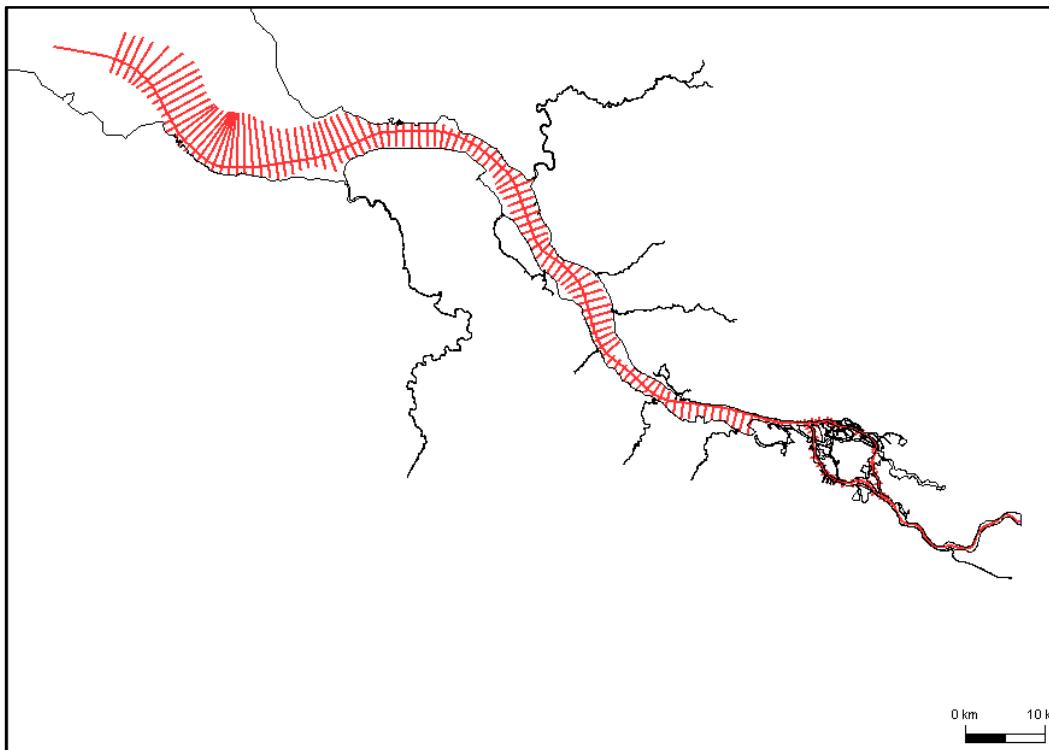


Bild 3: Verwendete Längs- und Querprofile in der Elbe.

Bewertungsgrundlage

Die fachwissenschaftliche Interpretation der Modell- bzw. Analyseergebnisse setzt ein Verständnis der wesentlichen Prozesse im Ästuarsystem voraus. Die allgemeinen wirkzusammenhänge auf das Tide- und Transportgeschehen im Ästuar werden im Bericht zum Bearbeitungskonzept [5] aufgeführt.

Bei der Interpretation und Bewertung der Ergebnisse spielen sowohl die Genauigkeit der Modellergebnisse als auch die Messgenauigkeit eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund werden ausbaubedingte Änderungen (Wirkungen) nur berücksichtigt, wenn sie einen sinnvollen, messtechnisch auch zu erfassenden Schwellenwert überschreiten. Die gewählten Schwellenwerte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Kenngröße	Schwellenwert
Δ Wasserstand	1,0 cm
Δ Strömungsgeschwindigkeit	2,5 cm/s
Δ Salzgehalt	0,1

Tabelle 2: Schwellenwerte der Tidekennwerte für ausbaubedingten Änderungen.

5 Untersuchungsumfang

Die Hamburg Port Authority hat verschiedene Flächen im Raum Hamburg benannt, auf denen Maßnahmen zur Schaffung von Flutraum denkbar sind. Für die einzelnen Maßnahmen (Bereiche) wurden jeweils verschiedene Varianten untersucht. Die Gesamtheit der untersuchten Varianten ist in Tabelle 3 aufgelistet. In Bild 4 bis Bild 8 sind die einzelnen Varianten in der Modelltopographie dargestellt.

Maßnahme	Variante	Kurzbezeichnung	zusätzliches Tidevolumen [Mio. m³]	Bescheinigung	dargestellt in	dokumentiert in Bericht
Kiesteich	1	KT1	2,0	Sohle im Tidekanal -2,5 mNN, Anschlussbreite 160 m	Bild 4	A39550310172-2
	2	KT2	2,1	Sohle im Tidekanal -4,5 mNN, Anschlussbreite 160 m		
	3	KT3	7,3	Sohle im Tidekanal -4,5 mNN + Erweiterung bis JVA		
	4	KT4	2,1	Sohle im Tidekanal -4,5 mNN, Anschlussbreite 40 m		A39550310172-3
Neuland	1	NL1	7,8	Flächen beidseitig BAB 1	Bild 5	A39550310172-2
	2	NL2	3,1	Flächen westlich BAB 1		
Neuland / Kiesteich	1	NLKT1	5,2	Kombination KT4 und NL2, Oberwasser = 350 m³/s	Bild 4 und Bild 5	Abschnitt 6.4.2
	2	NLKT2	5,2	Kombination KT4 und NL2, Oberwasser = 1500 m³/s		
Kreetsand	1	KS1	0,8	EM Spadenlander Busch, Kreetsand	Bild 6	A39550310172-4
Spadenlander Ausschlag	1	SP1	1,5	EM Sp. Ausschlag mit Anschluss nach Osten		
	2	SP2	1,5	EM Sp. Ausschlag mit Anschluss nach Westen		
Spadenlander Ausschlag / Kreetsand	1	SPKS1	2,3	Kombination KS1 und SP1		
	2	SPKS2	2,3	Kombination KS1 und SP2		
Alte Süderelbe	1	ASE1	4,9	Alte Süderelbe, Anschluss nach Osten, ungesteuert	Bild 7	A39550310172-5
	2	ASE2	5,3	Alte Süderelbe, Anschluss nach Westen, ungesteuert		
	3	ASE3	3,5	ASE1 reduzierte Fläche (ohne Südzipfel)		
	4	ASE4	5,3	Alte Süderelbe, beidseitiger Anschluss, ungesteuert		
	5	ASE5	5,3	ASE4 gesteuert, stromab gerichteter Durchfluss		
	6	ASE6	5,3	ASE4 gesteuert, stromauf gerichteter Durchfluss		
Neue Alte Süderelbe	1	NASE1	8,6	zweiseitiger Anschluss zum Köhlfleet	Bild 8	A39550310172-6
	2	NASE2	9,3	dreiseitiger Anschluss		
	3	NASE3	9,2	zweiseitiger Anschluss zum Mühlenberger Loch		

Tabelle 3: Tabellarische Übersicht des Untersuchungsumfangs.

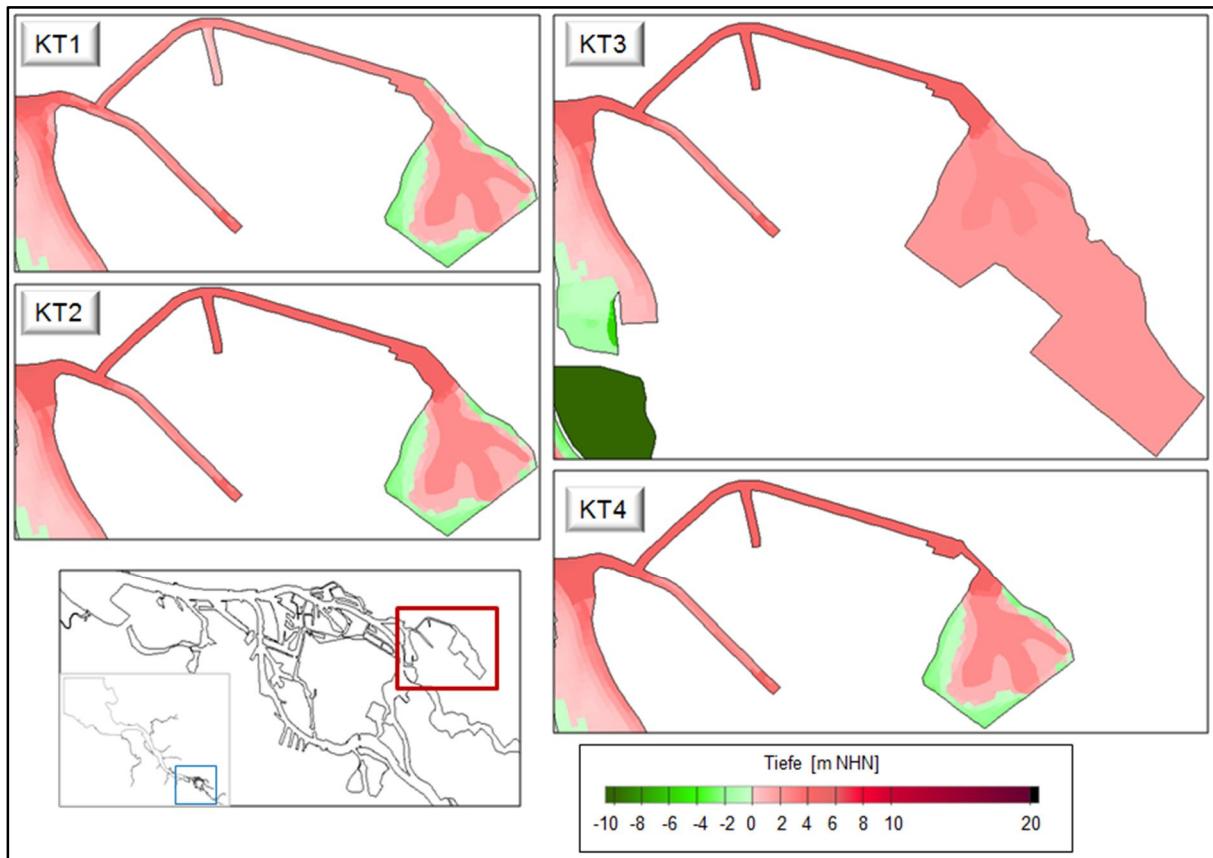


Bild 4: Ausschnitt der Modelltopographie der Maßnahme Kiesteich.

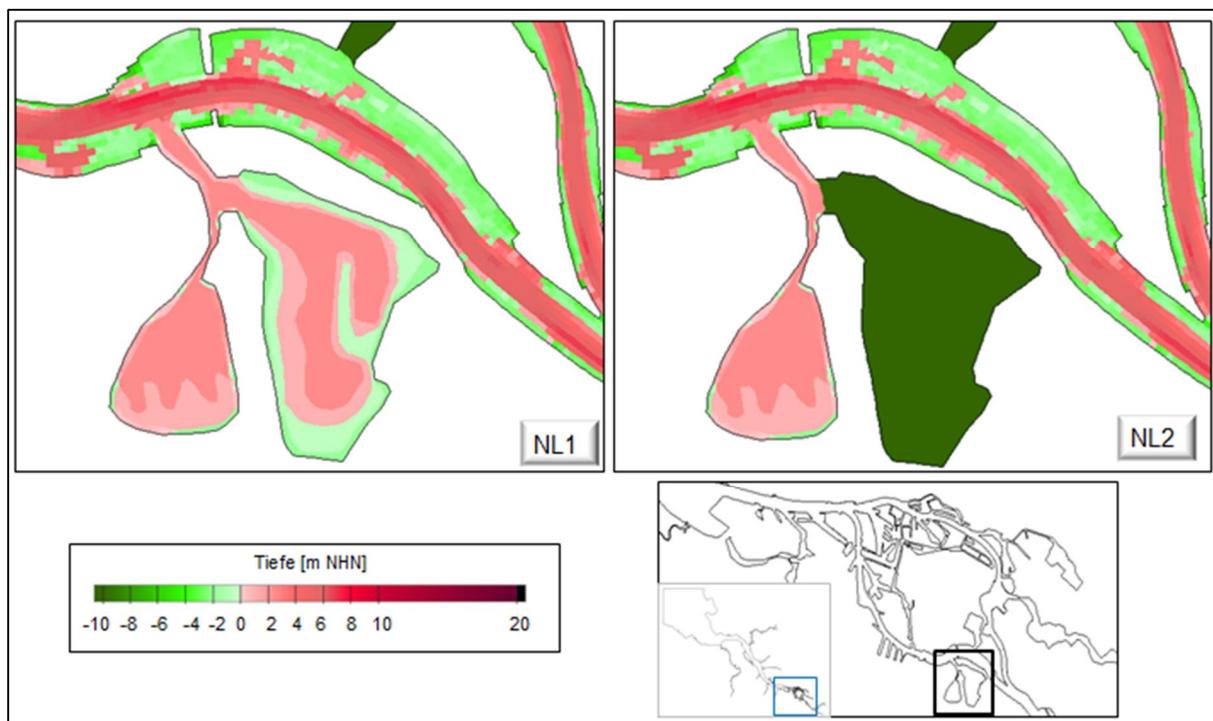


Bild 5: Ausschnitt der Modelltopographie der Maßnahme Neuland.

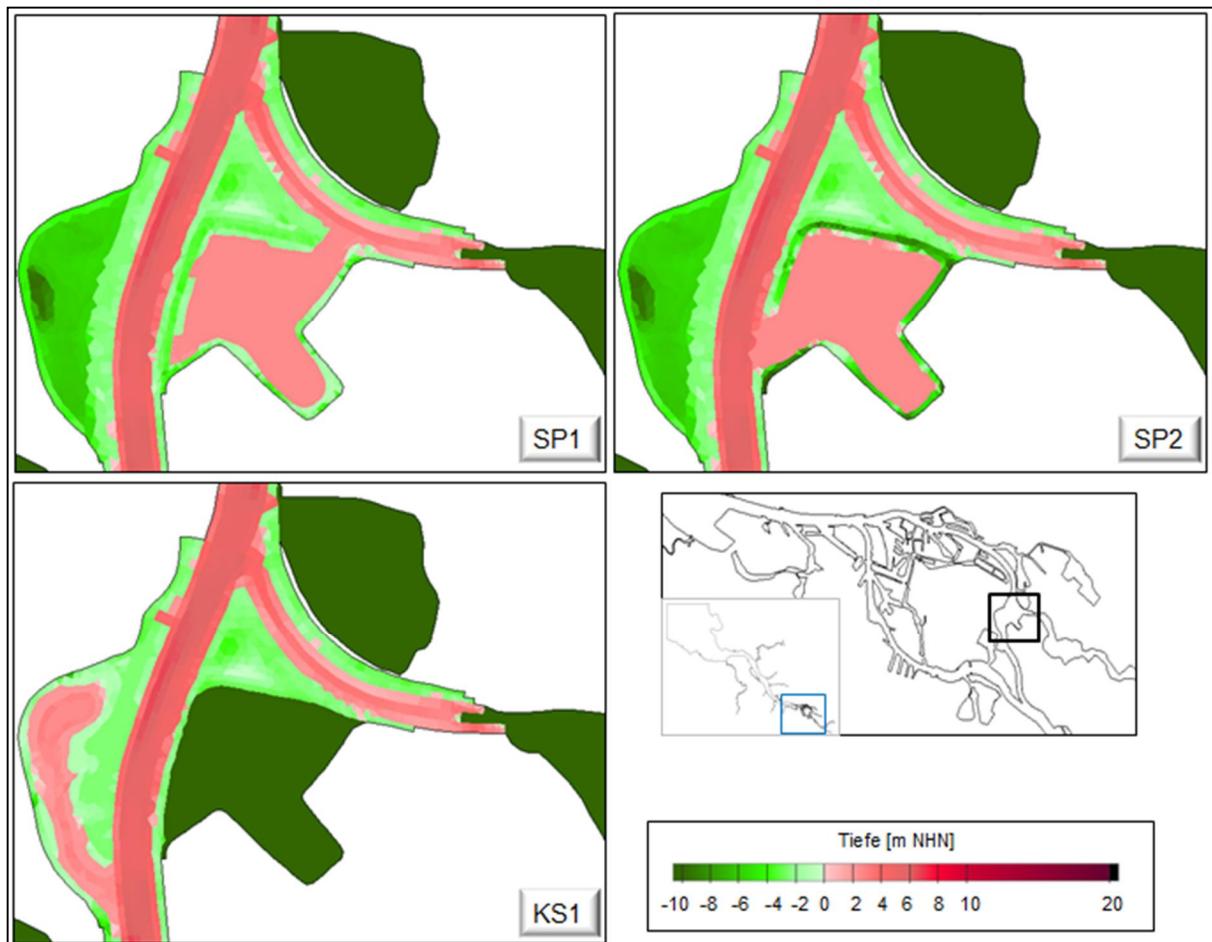


Bild 6: Ausschnitt der Modelltopographie der Maßnahmen Kreeetsand / Spadenlander Busch und Spadenlander Ausschlag.

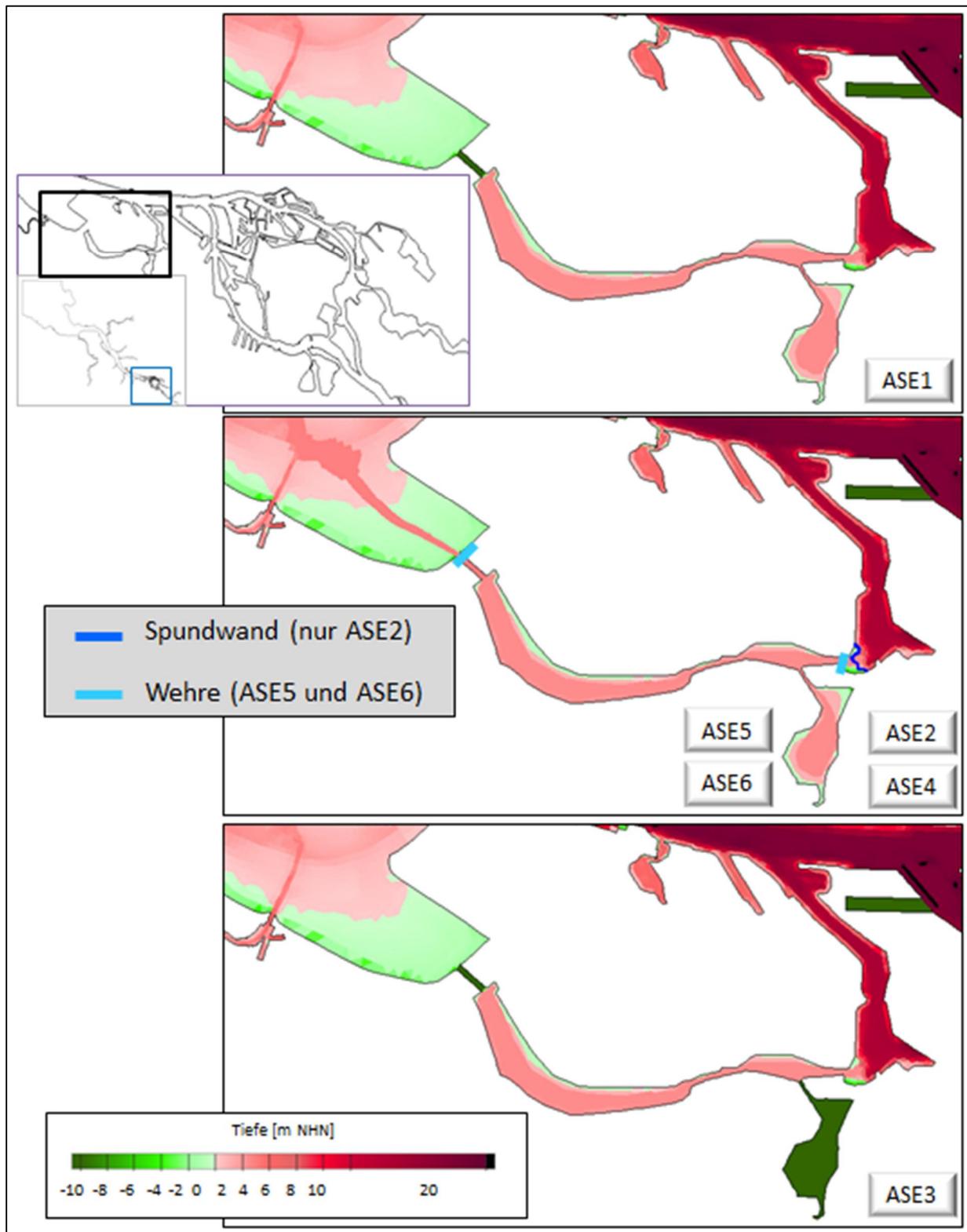


Bild 7: Ausschnitt der Modelltopographie der Maßnahme Alte Süderelbe.

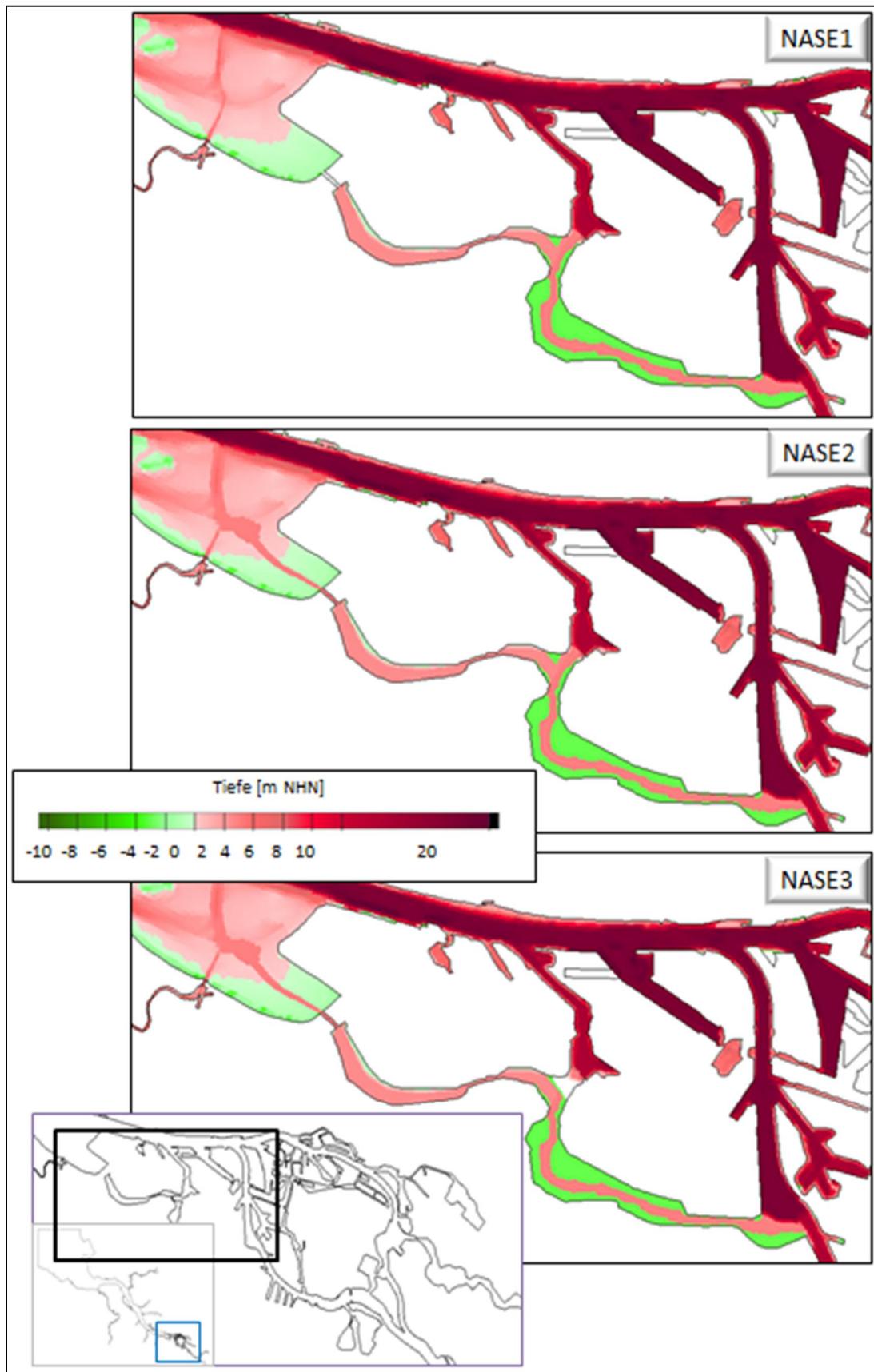


Bild 8: Ausschnitt der Modelltopographie der Maßnahme Neue Alte Süderelbe.

6 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden einzelne Einflüsse auf die Wirkung der Maßnahmen beleuchtet und die Ergebnisse der Untersuchung zusammengefasst. Die unterschiedliche Wirkung der betrachteten Maßnahmen und Varianten ist im Wesentlichen auf drei Faktoren zurückzuführen:

- Lage des Flutraums (Abschnitt 6.1)
- Größe des Flutraums (Abschnitt 6.2)
- Anschlussquerschnitt des Flutraums (Abschnitt 6.3)

In den Abschnitten 6.1 bis 6.2 wird dies anhand verschiedener Beispiele erläutert. Weitere Aspekte, die Einfluss auf die Wirkung eines Flutraumes haben, wie z.B. das Oberwasser und die Sohlrauheit, werden in Abschnitt 6.4 beschrieben.

Im Abschnitt 6.5 wird die Wirkung aller Maßnahmen und Varianten zusammengefasst. Details zu den einzelnen Maßnahmen sind den jeweiligen Einzelberichten (siehe Tabelle 3) zu entnehmen. Die Wirkung der Maßnahme Neue Alte Süderelbe wird in Abschnitt 6.6 detailliert beschrieben, da sie in keinem Einzelbericht enthalten ist.

6.1 Einfluss des Ortes des Flutraums

Der Ort an dem der Flutraum an die Tideelbe angeschlossen ist, beeinflusst die Wirkung der Maßnahme maßgeblich. Aus zwei Gründen ist die Lage im Hamburger Raum für den Anschluss von zusätzlichem Flutraum besonders geeignet. Zum einen aufgrund des Bereiches in dem die Wirkung auftritt und zum anderen aufgrund der Intensität der Wirkung.

Die Untersuchungen der BAW zeigen, dass der Tidehub im Bereich des angeschlossenen Flutraums oder unweit stromab davon stets am stärksten gedämpft wird. Der maximale Tidehub in der Elbe tritt in Hamburg (ca. Elbe-Km 615 bis Elbe-Km 620) auf (Bild 9, Diagramm 1). Beim Anschluss von zusätzlichem Flutraum in Hamburg wird der Tidehub damit genau in dem Bereich besonders stark reduziert, in dem der Tidehub vergleichsweise hoch ist. Weiterhin ist den Ergebnissen der BAW zu entnehmen, dass der Netto Schwebstofftransport vor allem stromab des angeschlossenen Flutraums sinkt. Bei einem Anschluss von Flutraum im Hamburger Raum wird dadurch vor allem der stromauf gerichtete Schwebstofftransport zwischen der Trübungszone und Hamburg reduziert. Damit tritt die Wirkung auf den Netto-Schwebstofftransport genau in dem, für die Unterhaltung des Hamburger Hafens besonders relevanten Bereich auf.

Die maximale Wirkung einer Maßnahme auf die Wasserstände, hängt ganz wesentlich davon ab an welchem Ort der Flutraum an die Tideelbe angeschlossen ist. Dies liegt vor allem an dem zur Mündung hin zunehmenden Tidevolumen und der Strecke auf der die Erhöhung des Tidevolumens wirken kann. Beispielhaft ist dies an einer Systemstudie der BAW [13] zu

erkennen. An zwei unterschiedlichen Stellen in der Tideelbe wird jeweils ein zusätzlicher Flutraum mit einem Tidevolumen von 10 Mio. m³ angeschlossen. Der Anschluss erfolgt in Hamburg (ca. Elbe-Km 625, St. Pauli) und bei Brunsbüttel (ca. Elbe-Km 695). In beiden Fällen ist der Anschlussbereich gleich breit (ca. 1800 m). Die Wirkung auf das mittlere Tideniedrigwassers (MTnw) und den MThb ist in Bild 9 (Diagramm 2) dargestellt. Der Anschluss des Flutraums bei Brunsbüttel reduziert das MTnw und den MThb stromauf der Anschlussstelle. Das Einschwingen der Tide in den zusätzlichen Flutraum, sowie der Transport des zusätzlichen Wasservolumens bis zum Flutraum benötigen Energie. Diese steht der Tidewelle stromauf des Flutraums nicht mehr zur Verfügung. Dadurch sinkt der Tidehub. Die Reduktion des MThb stromab von Brunsbüttel liegt unter 1 cm. Die Wirkung des in Hamburg angeschlossenen Flutraums auf die Wasserstände übersteigt die Wirkung des bei Brunsbüttel angeschlossenen Flutraums um ein Vielfaches. Das Tidevolumen eines Querschnitts in Hamburg ist deutlich kleiner als das bei Brunsbüttel. Relativ zum jeweiligen Tidevolumen wird in Hamburg daher ein größeres zusätzliches Volumen angeschlossen als bei Brunsbüttel. Die Strecke von der Nordsee bis nach Hamburg ist deutlich länger als die Strecke bis nach Brunsbüttel. Der Anschluss des zusätzlichen Tidevolumens in Hamburg wirkt daher über eine längere Strecke als bei dem Anschluss bei Brunsbüttel. Der Tidewelle wird mehr Energie entzogen, was zu einer stärkeren Tidehubreduktion führt. Gegenüber dem Anschluss bei Brunsbüttel ist die Tidehubreduktion beim Anschluss des Flutraums bei Hamburg mehr als zehn Mal so groß.

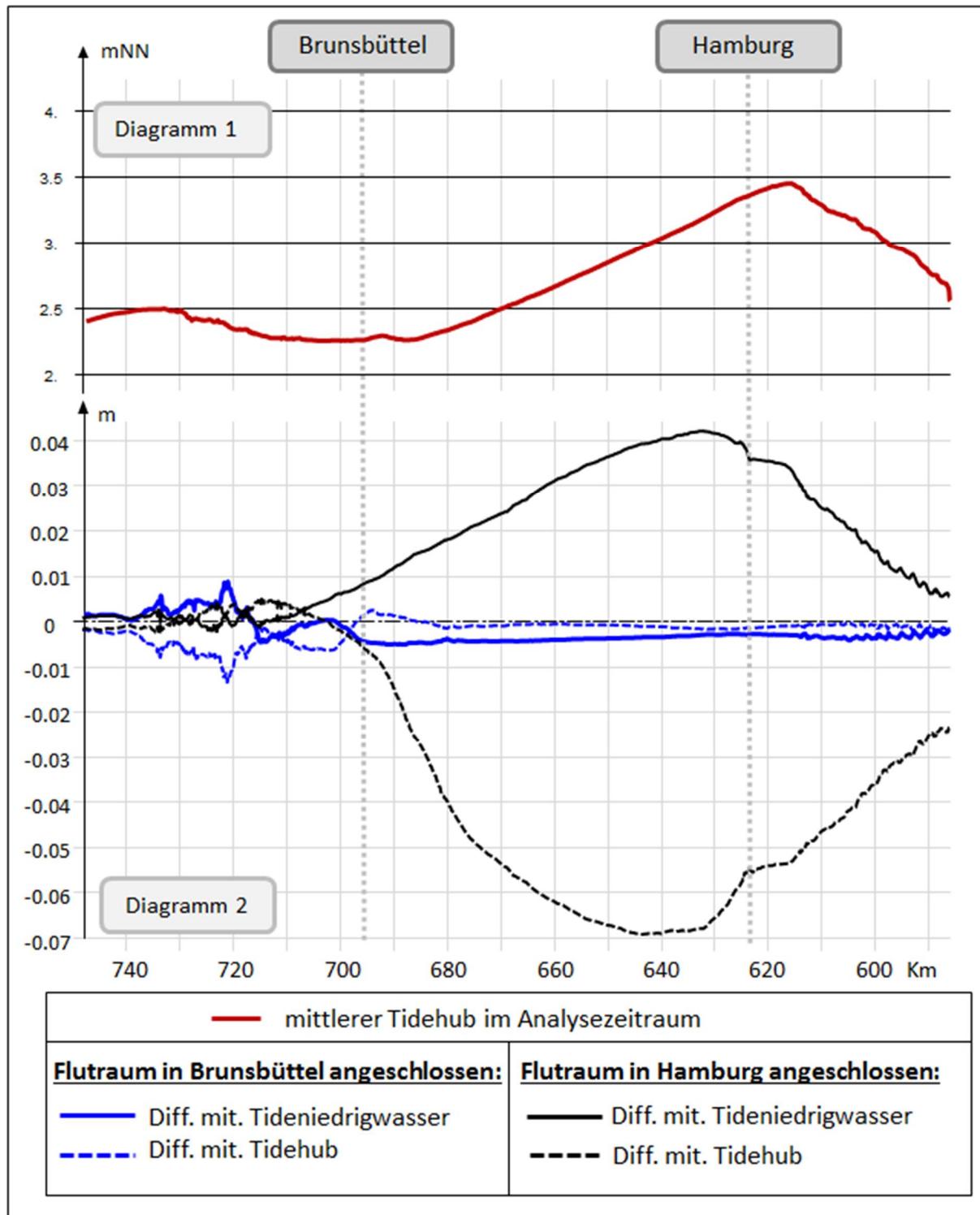


Bild 9: Systemstudie zur Lage des Flutraums. Diagramm1: mittlerer Tidehub im Analysezeitraum. Diagramm 2: Wirkung (Differenz AZ-PIZ) eines 10 Mio. m³ großen Flutraums in Hamburg und Brunsbüttel auf das MTnw und den MThb in der Tideelbe.

6.2 Einfluss der Größe des Flutraums

Die Größe eines Flutraums hat einen großen Einfluss auf die Systemreaktion des Ästuars. Entscheidend ist dabei das Tidevolumen des Flutraums. Das Wasservolumen unterhalb des Tnw spielt nur hinsichtlich des Reibungseinflusses (abhängig von der Wassertiefe) eine Rolle. Generell gilt, dass die Wirkung des Flutraums umso größer ist, je größer das Tidevolumen des angeschlossenen Flutraums ist.

Anhand der Ergebnisse einiger untersuchter Maßnahmen wird die Bedeutung der Größe des angeschlossenen Flutraumes deutlich. Bei den Maßnahmen Neuland (NL1 und NL2), Kiesteich (KT2 und KT3) und Alte Süderelbe (ASE1 und ASE3) findet eine Variation der Größe des Flutraums statt. Bei allen drei Maßnahmen steigt die Wirkung auf die Wasserstände in der Tideelbe mit der Größe des angeschlossenen Tidevolumens. Der Querschnitt des Anschlusses bleibt bei allen Maßnahmen jeweils gleich groß. Die maximale Wirkung eines Flutraums auf die Wasserstände in der Elbe ist näherungsweise linear zur Größe des angeschlossenen Tidevolumens. Allerdings sind die Wirkmechanismen zu komplex, als dass die gesamte Wirkung einer Maßnahme linear abhängig vom angeschlossenen Tidevolumen wäre. Beispielsweise ist dies in Bild 10 für die Maßnahme Neuland dargestellt. Das angeschlossene Tidevolumen ist bei der Variante NL1 (ca. 7,8 Mio. m³) etwa 2,5-mal so groß wie bei der Variante NL2 (ca. 3,1 Mio. m³). In Bild 10 ist die Wirkung beider Varianten auf den MThb auf einem Längsprofil durch die Elbe dargestellt. Die blau gestrichelte Kurve in Bild 10 skizziert das 2,5-fache der Wirkung der Variante NL2.

Die Wirkung zusätzlichen Flutraumes auf die Strömungsgeschwindigkeiten und den Netto Schwebstofftransport ist ebenfalls näherungsweise linear von der Größe des angeschlossenen Tidevolumens abhängig.

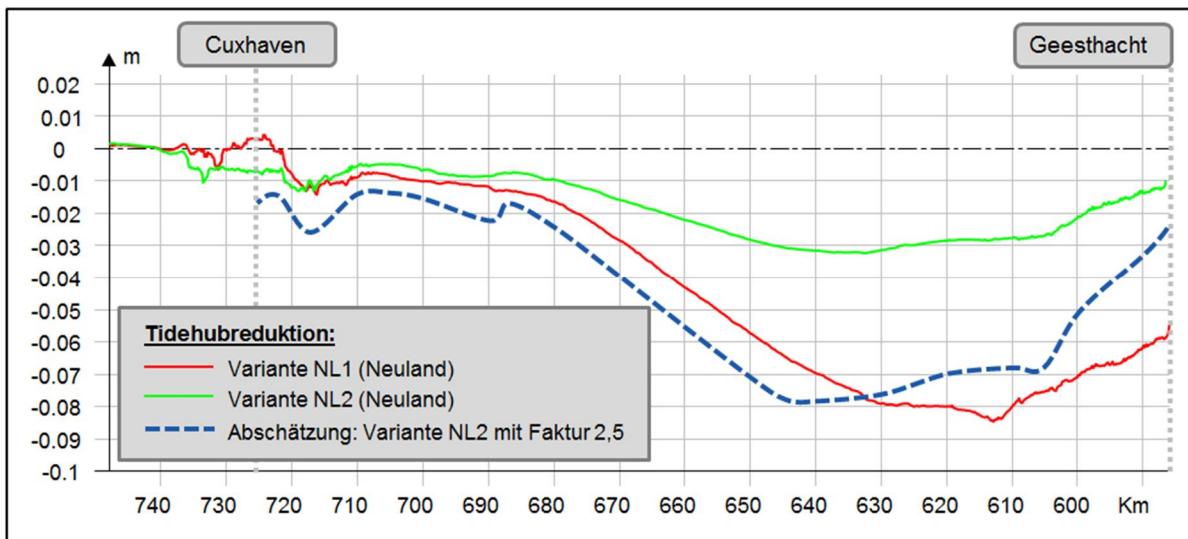


Bild 10: Tidehubreduktion der beiden Varianten der Maßnahme Neuland.

6.3 Einfluss des Querschnitts im Anschlussbereich

Die Anströmung eines Flutraumes wird durch den Fließquerschnitt zwischen dem Flutraum und der Elbe maßgeblich beeinflusst. Oft kann der Anschluss nicht über die gesamte Breite eines Flutraums erfolgen. Ist der Querschnitt im Anschlussbereich zu klein, wird das Ein- und Ausströmen behindert. Der Flutraum kann in diesem Fall nicht vollständig ausgenutzt werden. Zu erkennen ist dies z.B. an den Varianten KT2 und KT4 der Maßnahme Kiesteich. Die Variante KT4 unterscheidet sich von der Variante KT2 nur durch einen um 75 % kleineren Anschlussquerschnitt. Die Wirkung des Flutraums auf den MThb in der Elbe bei Hamburg ist bei der Variante KT4 etwa halb so groß wie bei der Variante KT2 (Bild 11).

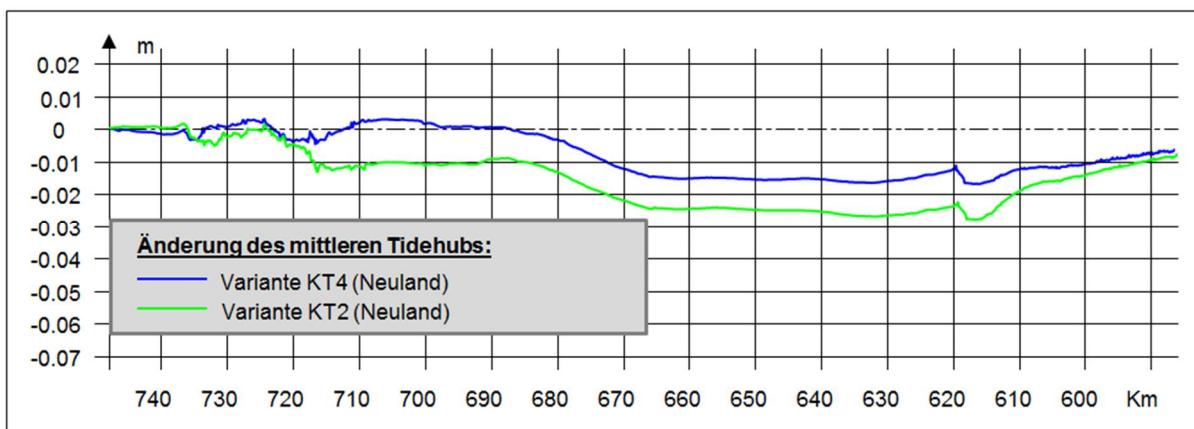


Bild 11: Differenz (AZ-PIZ) des mittleren Tidehubs für die Varianten KT2 und KT4 der Maßnahme Kiesteich. Der in KT4 gegenüber der Varianten KT2 etwa um 75 % kleinere Querschnitt im Anschlussbereich des Flutraums reduziert die Wirkung der Maßnahme.

Ein großer Querschnitt im Anschlussbereich der Maßnahme wirkt allerdings nicht zwingend positiv auf die Wirkung des Flutraums. Der Einfluss des Querschnitts im Anschlussbereich der Maßnahme ist stark von den lokalen Gegebenheiten abhängig. Dies verdeutlicht eine Systemstudie der BAW [13], bei der ein zusätzliches Tidevolumen von 10 Mio. m³ in Hamburg (ca. Elbe-Km 625, St. Pauli) angeschlossen wird. Es werden zwei Varianten mit einer Breite des Anschlusses von 1800 m und 100 m betrachtet. Die Wirkung des Flutraums auf den MThb in der Tideelbe sinkt durch die kleinere Anschlussbreite gegenüber der Variante mit dem 1800 m breiten Anschluss um ca. 15 %. Der Anstieg der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Elbe fällt bei der Variante mit dem schmaleren Anschluss geringer aus. Vor allem bei Flutstrom steigt die maximale Strömungsgeschwindigkeit bei dem schmaleren Anschluss weniger stark als bei dem breiteren Anschluss. Dadurch unterscheidet sich die Wirkung der beiden Varianten auf das maximale F:E Verhältnis (Verhältnis der Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit, siehe Bild 12, Diagramm 2). Bei dem schmaleren Anschluss wird das maximale F:E Verhältnis in dem flutstromdominanten Bereich stromab von Hamburg (Bild 12, Diagramm 1) reduziert. Bei dem breiten Anschluss steigt das F:E Verhältnis im selben Bereich an.

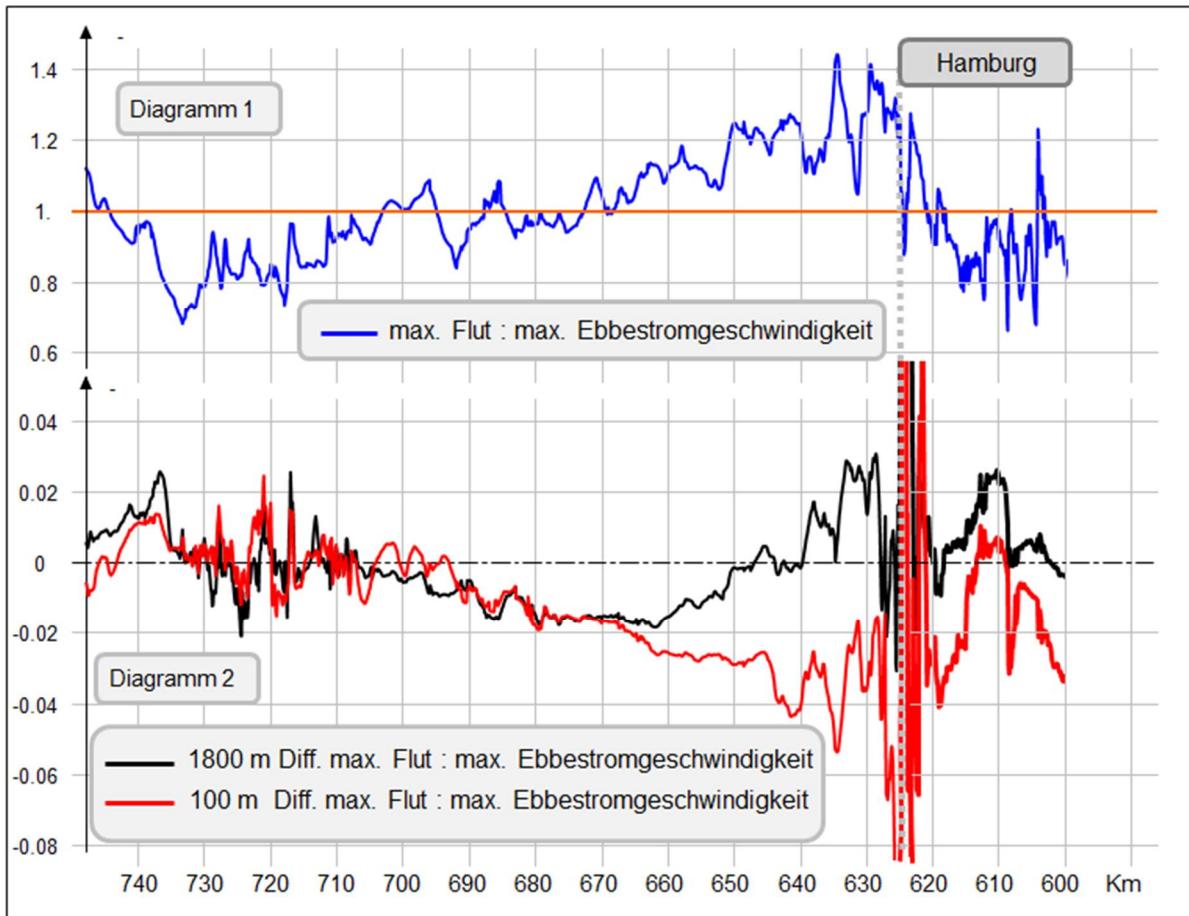


Bild 12: Systemstudie zum Querschnitt im Anschlussbereich eines Flutraums. Diagramm 1: max. F:E-Verhältniss im Referenzzustand in der Tideelbe. Diagramm 2: Wirkung (Differenz AZ-PIZ) eines Flutraums in Hamburg mit einer Öffnungsbreite des Anschlusses von 100 m bzw. 1800 m auf das max. F:E-Verhältniss in der Tideelbe.

6.4 Weitere Aspekte zum Anschluss zusätzlichen Flutraums

6.4.1 Kombination von Maßnahmen

Beim gleichzeitigen Anschluss mehrerer Fluträume kommt es zu wechselseitigen Beeinflus- sungen. Die Wirkung einzeln untersuchter Fluträume kann daher nicht einfach summiert werden. Deutlich wird dies aus dem untersuchten kombinierten Anschluss der Maßnahmen Spadenlander Ausschlag und Kreetsand (SPKS1 und SPKT2) [14] sowie den Maßnahmen Neuland und Kiesteich (NLKT1). In Bild 13 ist die Wirkung (Differenz AZ-PIZ) der Maßnahmen Kiesteich (Variante KT4), Neuland (Variante NL2) sowie des kombinierten Anschlusses beider Fluträume auf den MThb, die maximale Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit sowie den Netto-Schwebstofftransport dargestellt. Es ist bei allen Analysegrößen zu erkennen, dass sich die Wirkung der Variante NLKT1 (Kombination der Maßnahmen Neuland und Kiesteich) aus der Wirkung der beiden Einzelnen Maßnahmen (NL2 und KT4) zusammen-

setzt. Dabei ist die Wirkung bei einem kombinierten Anschluss beider Fluträume immer kleiner als die Summe der Wirkungen beider Einzelmaßnahmen.

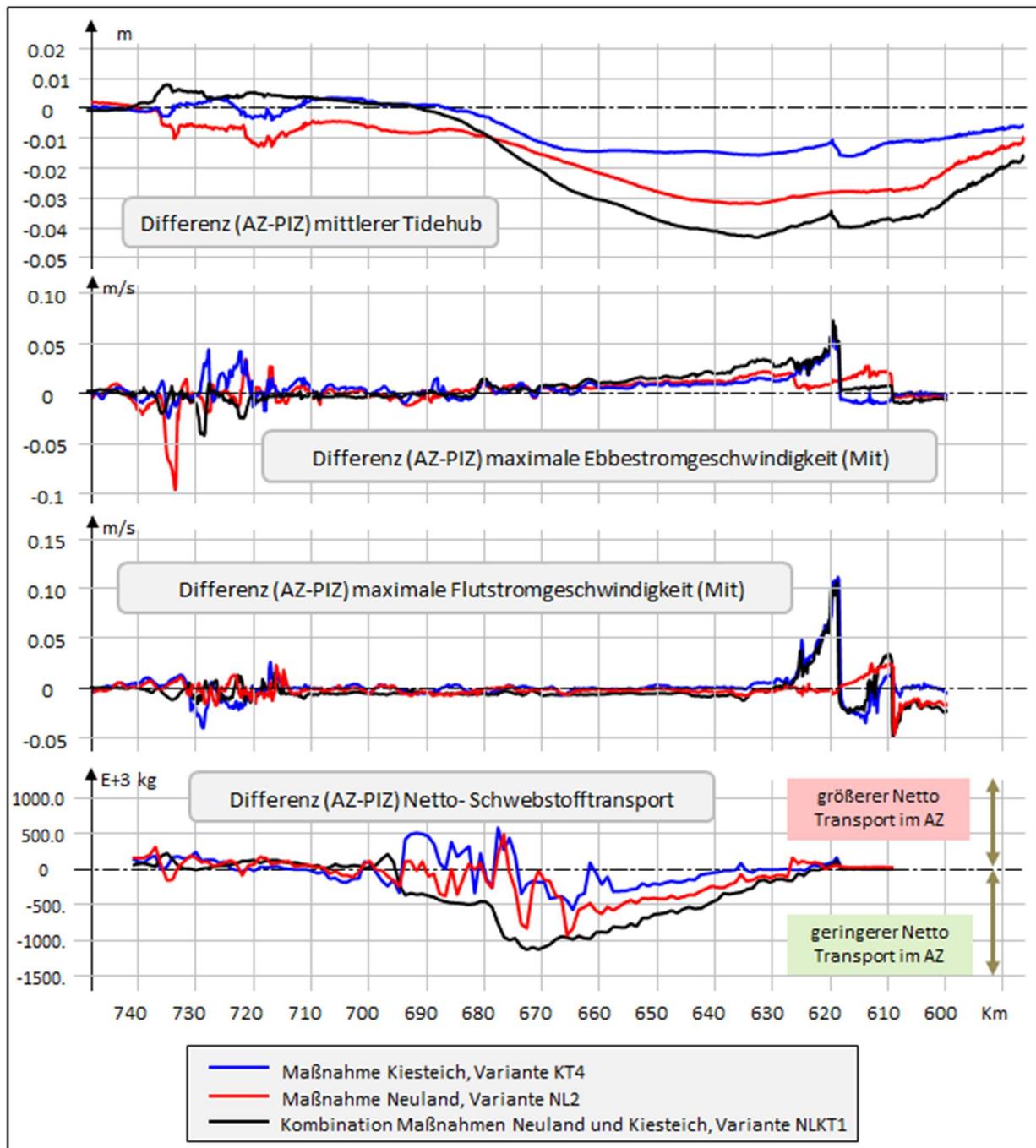


Bild 13: Wirkung (Differenz AZ-PIZ) der Maßnahmen Neuland (NL2), Kiesteich (KT4) sowie der Kombination beider Maßnahmen (NLKT1) auf den MThb, die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten und den Netto-Schwebstofftransport auf dem Längsprofil durch die Elbe.

6.4.2 Einfluss des Oberwassers

Das mittlere Oberwasser der Tideelbe liegt bei ca. 710 m³/s. Der langjährig häufigste Abfluss liegt bei ca. 350 m³/s. Einige Kenngrößen des Oberwasserabflusses der Tideelbe sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Niedrigster beobachteter Abfluss	NQ	145 [m ³ /s]
Mittlerer niedrigster Abfluss	MNQ	276 [m ³ /s]
Mittlerer Abfluss	MQ	710 [m ³ /s]
Mittlerer höchster Abfluss	MHQ	1930 [m ³ /s]
Höchster beobachteter Abfluss	HQ	3620 [m ³ /s]

Tabelle 4: Kenngrößen des Abfluss am Pegel Neu Darchau [15].

Für die Untersuchungen der angeschlossenen Fluträume wird konstanter der langjährig häufigste Abfluss von 350 m³/s angenommen. Der Einfluss eines höheren Abflusses wird am Beispiel der Kombination der Maßnahmen Kiesteich (KT4) und Neuland (NL2) bestimmt. Die Maßnahmenkombination wird zusätzlich mit einem konstanten Oberwasser von 1500 m³/s gerechnet.

Das Oberwasser wirkt dämpfend auf die in das Ästuar einlaufende Tidewelle. Dadurch sinkt der mittlere Tidehub bei steigendem Oberwasser (Bild 14). Das Tideniedrig-, Tidehoch- und Tidemittelwasser steigt mit der Menge des Oberwassers. Stromauf des Sohlsprungs in Hamburg (ca. Elbe-Km 620) ist der Einfluss des Oberwassers besonders stark.

Die bei steigendem Oberwasser geringere Energie der Tidewelle im Hamburger Raum führt dazu, dass die Wirkung der in Hamburg angeschlossenen Fluträume auf die Wasserstände stromab der Maßnahmen mit steigendem Oberwasser zunimmt (Bild 15, Diagramm 1). Das Tidenvolumen des angeschlossenen Flutraums sinkt zwar bei einem geringeren Tidehub im Bereich der Maßnahmen (Elbe-Km 618 und Süderelbe-Km 613), dem gegenüber steht aber ein Anstieg des angeschlossenen Tidenvolumens durch den Anstieg des Tidemittelwassers. Dieser ist auf die Topographie der Fluträume (Böschungen) zurückzuführen. Durch die unterschiedliche Fließrichtung der einlaufende Tidewelle und des nach stromab gerichteten Oberwassers wird ein Teil der Tidewelle am Oberwasser reflektiert. Dieser Effekt ist aufgrund des geringen Fließquerschnitts stromauf des Sohlsprungs (ca. Elbe-Km 620) besonders ausgeprägt. Mit steigender Oberwassermenge nimmt die Reflexion der Tidewelle zu. Dadurch sinkt mit der Menge des Oberwassers nicht nur der Tidehub, sondern auch die reduzierende Wirkung eines Flutraumes auf den Tidehub.

Auf die Änderung der maximalen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit (Bild 15, Diagramme 2 und 3) durch den Anschluss von zusätzlichem Flutraum hat das Oberwasser nur einen geringen Einfluss.

Die Lage der Brackwasserzone wird durch die Menge des Oberwassers beeinflusst. Bei hohem Oberwasser liegt die Brackwasserzone weniger weit im Ästuar. Die Wirkung des Flutraums auf den maximalen Salzgehalt (Bild 15, Diagramm 4) basiert bei unterschiedlichen Oberwasserszenarien daher auf unterschiedlichen Ausgangszuständen. Durch die unterschiedliche Lage der Brackwasserzone ist die Abnahme des maximalen Salzgehalts zwischen Elbe-Km 660 und Elbe-Km 685 bei höherem Oberwasser (Variante NLKT2) geringer als bei niedrigem Oberwasser (Variante NLKT1). Zwischen Elbe-Km 685 und Elbe-Km 730 ist die Abnahme des maximalen Salzgehalts bei höherem Oberwasser (Variante NLKT2) dagegen größer als bei niedrigem Oberwasser (Variante NLKT1).

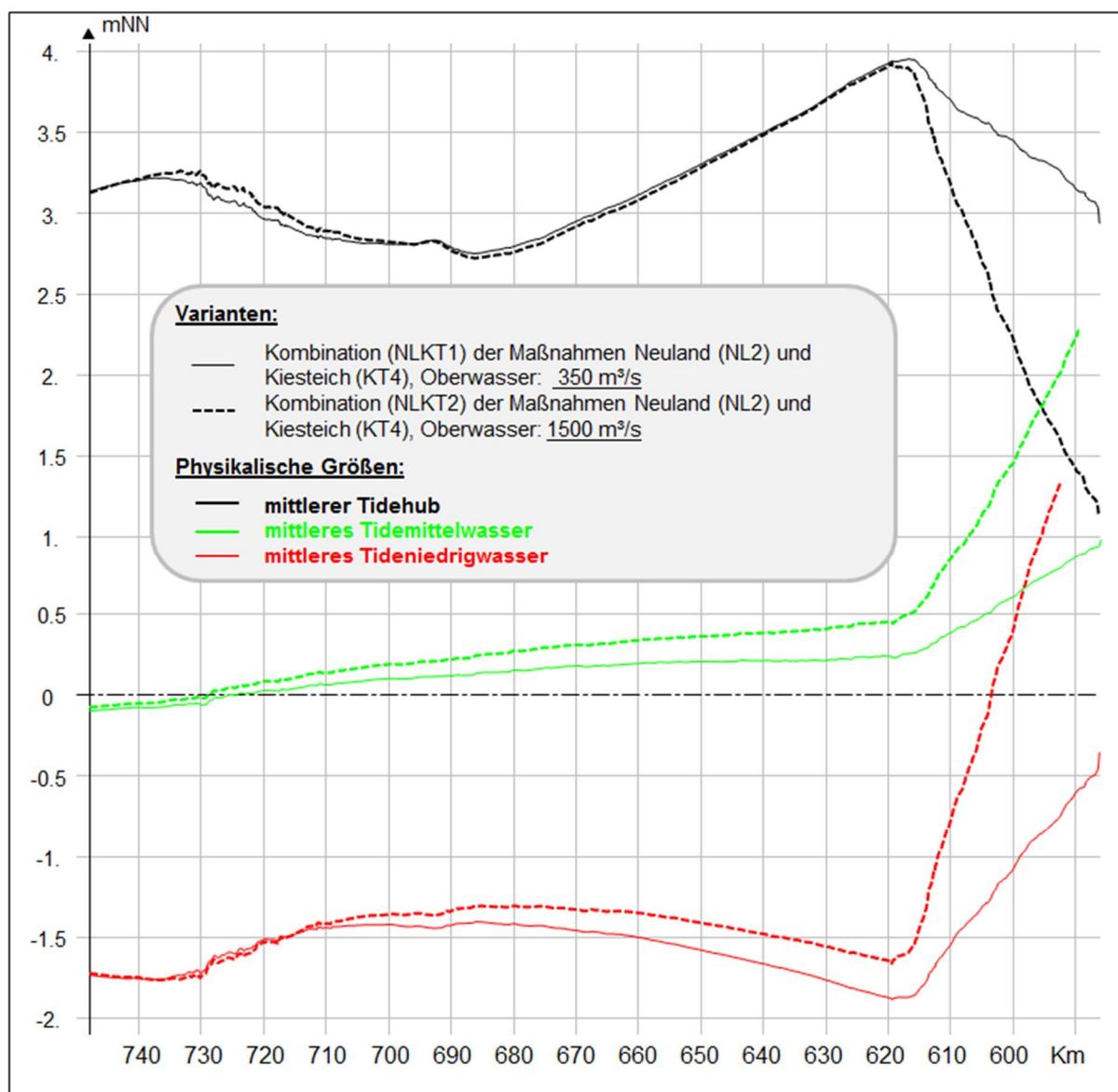


Bild 14: MThb, MTmw und MTnw bei der Kombination der Maßnahmen Neuland (NL2) und Kiesteich (KT4) bei einem konstanten Oberwasser von 350 m³/s (NLKT1) und von 1500 m³/s (NLKT2, gestrichelte Linien) auf dem Längsprofil durch die Elbe.

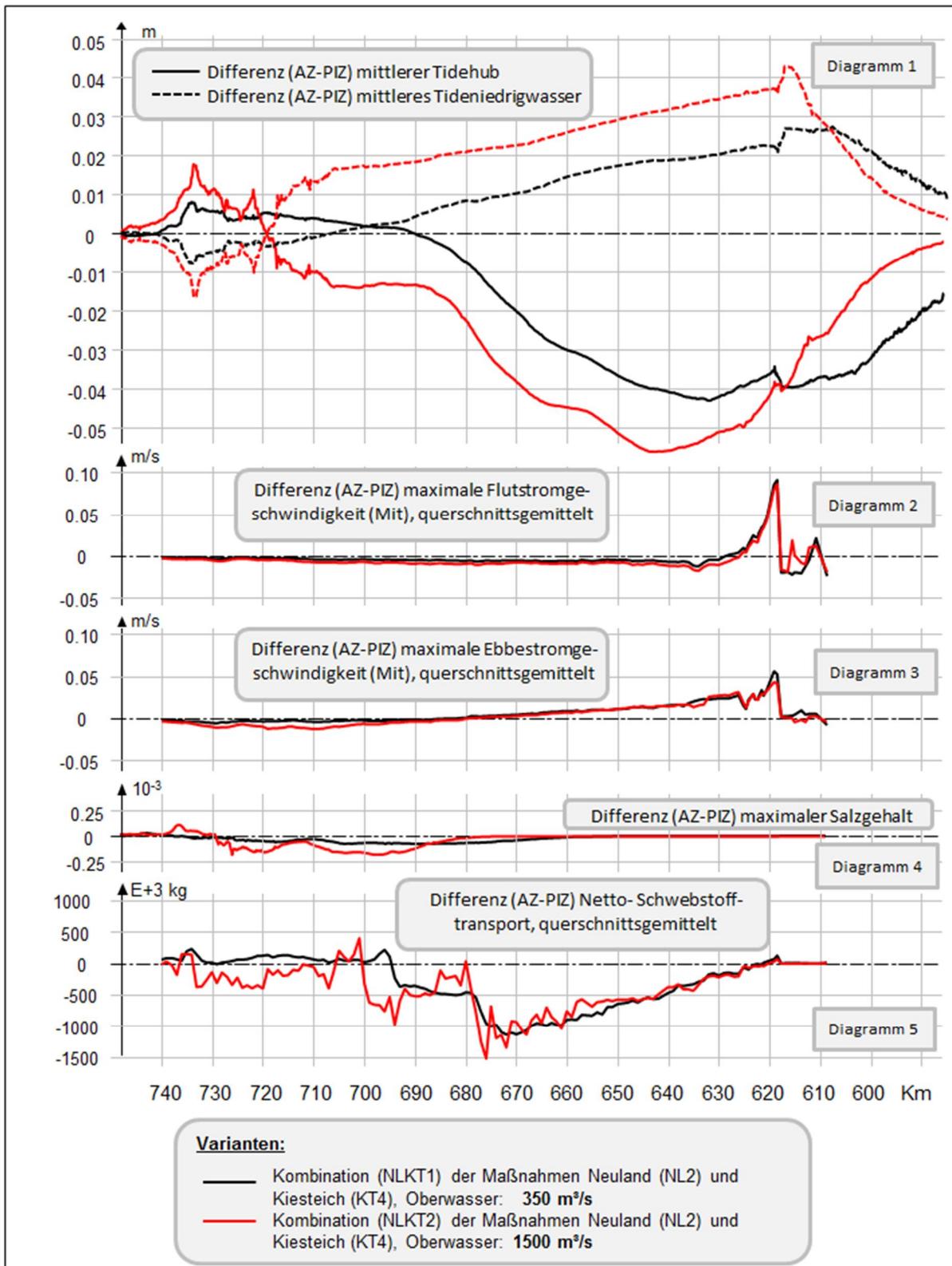


Bild 15: Wirkung (Differenz AZ-PIZ) der Kombination der Maßnahmen Neuland (NL2) und Kiesteich (KT4) bei einem konstanten Oberwasser von $350 \text{ m}^3/\text{s}$ (NLKT1) und $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ (NLKT2) auf ausgewählte Analysegrößen auf dem Längsprofil durch die Elbe.

Auf die Wirkung der angeschlossenen Fluträume auf den Netto-Schwebstofftransport (Bild 15, Diagramm 5) hat die Oberwassermenge keine große Auswirkung. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass der Netto-Schwebstofftransport stark oberwasserabhängig ist. Bei einem niedrigen Oberwasserabfluss findet stromab von Hamburg in der gesamten Tideelbe ein stromauf gerichteter Netto-Schwebstofftransport statt (schwarze Kurve in Bild 16). Bei höherem Oberwasser treten zunehmend Abschnitte auf, in denen der Netto-Schwebstofftransport in Richtung stromab gerichtet ist (rote Kurve in Bild 16). Je nach Oberwasserzufluss bewirkt der Anschluss zusätzlichen Flutraums daher eine Reduktion des stromauf gerichteten Netto-Schwebstofftransports, eine Zunahme des stromab gerichteten Netto-Schwebstofftransports oder eine Umkehr der Richtung des Netto-Schwebstofftransports.

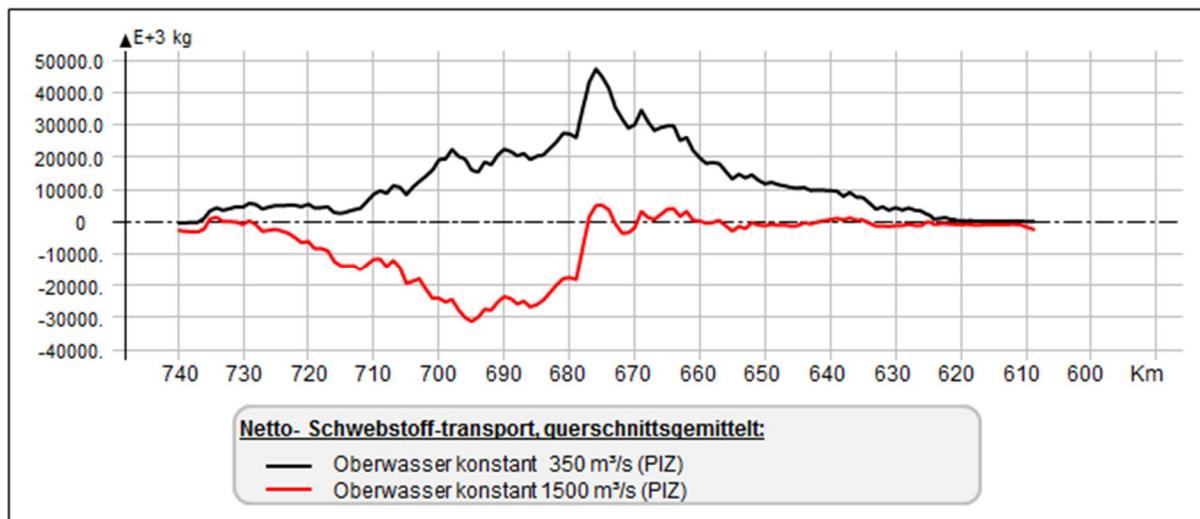


Bild 16: Querschnittsintegrierter Netto-Schwebstofftransport (positiv Richtung stromauf) im Planerischen Ist-Zustand bei konstantem Oberwasser von $350 \text{ m}^3/\text{s}$ und $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ auf dem Längsprofil in der Elbe.

6.4.3 Einfluss der Rauheit innerhalb des Flutraums

Die Sohlrauheit innerhalb eines Flutraums beeinflusst die Energie, die für das Ein- und Ausströmen des Wassers in bzw. aus einem Flutraum erforderlich ist. Je größer die Rauheit ist, desto höher ist die Energiedissipation infolge Reibung. Eine hohe Sohlrauheit kann zu einer Absenkung des Tidehubs innerhalb des Flutraums führen und dadurch das angeschlossene Tidevolumen reduzieren. Außerdem dämpft eine hohe Sohlrauheit die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Flutraums, woraus sich eine Veränderung der hypsometrischen² Kurve ergibt.

² Die hypsometrische Kurve eines geographischen Gebiets ergibt sich durch das Auftragen des Volumens über das Höhenniveau.

In einer Systemstudie wird der Einfluss der Sohlrauheit auf die Wirkung der Maßnahme Kiesteich (KT4) in der Tideelbe untersucht. Bei einer Variante (blaue Kurve in Bild 17, Diagramm 1) entspricht die Sohlrauheit der Kornrauheit des Sedimentinventars³. Bei der anderen Variante (grüne Kurve in Bild 17 Diagramm 1) wird die Sohlrauheit um den Faktor 2,5 erhöht.

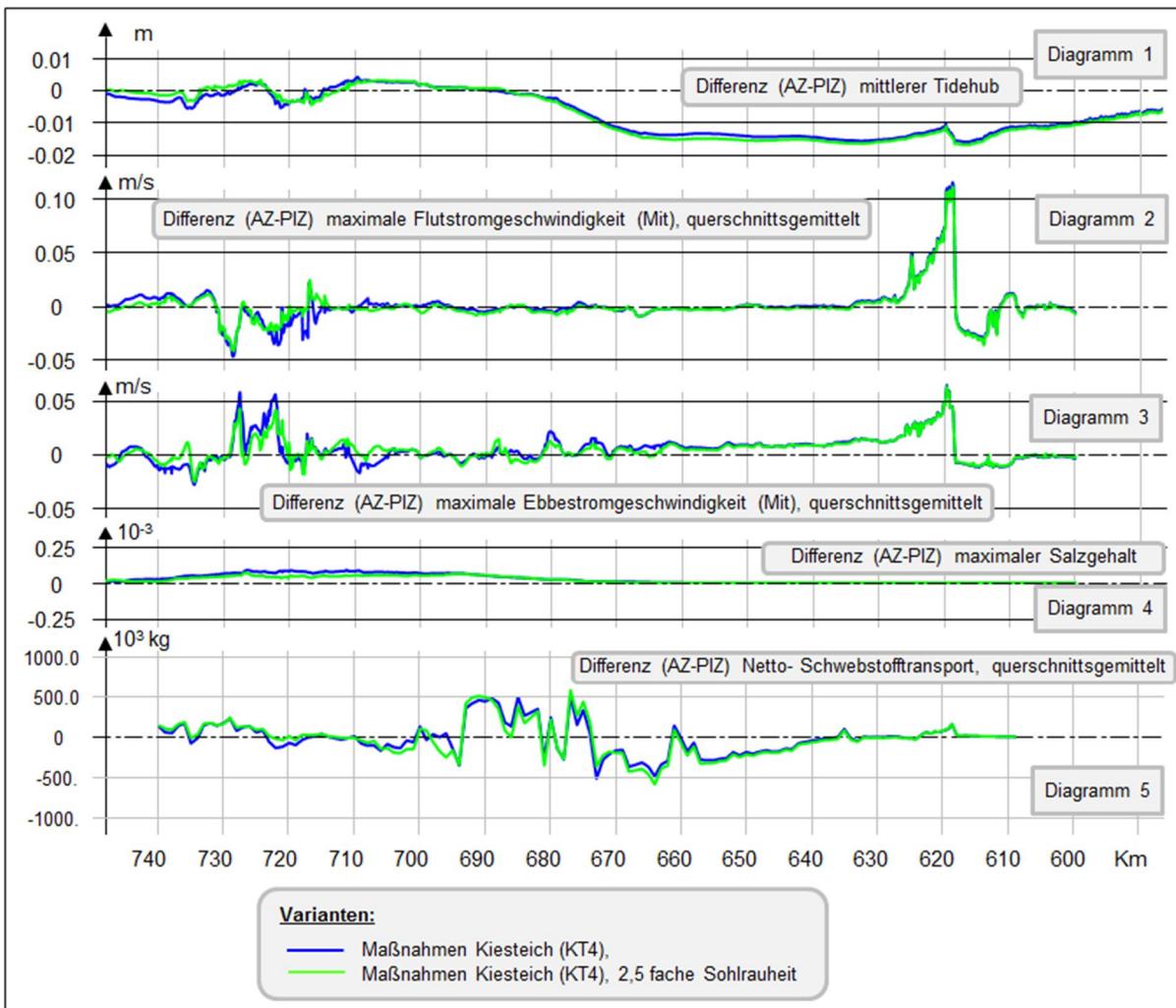


Bild 17: Systemstudie zum Einfluss der Sohlrauheit innerhalb des Flutraums der Maßnahme Kiesteich (KT4). Wirkung (Differenz AZ-PIZ) der Maßnahmen Kiesteich (KT4) auf dem Längsprofil durch die Elbe auf den MThb, die maximale Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit, den maximalen Salzgehalt und den Netto-Schwebstofftransport bei einer um den Faktor 2,5 variierenden Sohlrauheit.

Bei der Variante mit der höheren Sohlrauheit wird der MThb in der Elbe stärker gedämpft als bei der Variante mit der geringeren Sohlrauheit. Der Unterschied der Tidehubreduktion beider Varianten ist allerdings sehr gering. Auch auf die Strömungsgeschwindigkeit in der

³ Zusammensetzung: je ca. 2,5 % grober- und sehr grober Sand, ca. 37 % sehr feiner Sand, ca. 28 % Feinsand, je ca. 10 % Mittelsand, Grob- und Mittelschluff.

Tideelbe (Bild 17, Diagramm 2 und 3) hat die Variation der Sohlrauheit keinen signifikanten Einfluss. Der Anstieg des maximalen Salzgehalts (Bild 17, Diagramm 4) fällt bei der Variante mit der höheren Sohlrauheit etwas geringer aus als bei der Variante mit der kleineren Sohlrauheit. Auf den Netto-Schwebstofftransport (Bild 17, Diagramm 5) in der Elbe hat die Variation der Sohlrauheit keine signifikante Wirkung.

Die Systemstudie verdeutlicht, dass eine größere Sohlrauheit die Wirkung des Flutraums auf die Wasserstände vergrößert. Der Einfluss der Sohlrauheit ist im Verhältnis zur Gesamtwirkung des Flutraums hinsichtlich aller betrachteten Analysegrößen allerdings vernachlässigbar gering.

6.4.4 Wehrsteuerung

Der Einfluss eines wehrgesteuerten Anschlusses eines Flutraums an die Tideelbe wird am Beispiel der Maßnahme Alte Süderelbe untersucht. Die Ergebnisse werden in dem Bericht zur Maßnahme Alte Süderelbe [16] detailliert beschrieben. Die untersuchten Wehrsteuerungen zur Regelung des Ein- und Ausströmens des Wassers in bzw. aus dem Flutraum verändern die Wirkung des angeschlossenen Tidevolumens nicht signifikant. Eine Wehrsteuerung kann aber zur Optimierung des Sedimentmanagements innerhalb der Maßnahme oder in deren Nahbereich beitragen (z.B. durch eine Spülwirkung).

6.5 Ergebnisübersicht aller Varianten der untersuchten Maßnahmen

Die Modellergebnisse lassen sich anhand der in Abschnitt 3 aufgeführten allgemeinen Wirkzusammenhänge beim Anschluss eines Flutraums erklären. Alle Varianten der untersuchten Maßnahmen führen zu einer Abnahme des Tidehubs in der Tideelbe. Die Wirkung eines Flutraums auf den Tidehub erstreckt sich bei allen Varianten der untersuchten Maßnahmen auf eine Strecke von ca. 100 Flusskilometern (Elbe-Km 585 bis mindestens 680). Die Tidehubreduktion setzt sich aus einem Anstieg des mittleren Tideniedrigwassers und einer Abnahme des mittleren Tidehochwassers (MThw) zusammen. Die Wirkung der Maßnahmen schwankt (je nach Variante) zwischen einer Tidehubreduktion von ca. 1 cm und ca. 10 cm in Hamburg. Bei allen Varianten der untersuchten Maßnahmen ist die Stützung des mittleren Tideniedrigwassers (zwischen ca. 1 cm und ca. 8 cm) größer oder gleich der Abnahme des mittleren Tidehochwassers (zwischen ca. 0,5 cm und ca. 4 cm). Die maximale Wirkung aller Varianten der untersuchten Maßnahmen auf die Wasserstände (Werte in der Süderelbe werden nicht berücksichtigt) ist in Tabelle 5 aufgelistet.

Stromauf der angeschlossenen Flächen nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund des kleineren zu transportierenden Wasservolumens (Tidehubreduktion), je nach Maßnahme und Variante um bis zu ca. 12 cm/s (maximale Flutstromgeschwindigkeit) ab. Stromab des

Flutraums muss bei gleichbleibender Tidedauer ein größeres Wasservolumen (Volumen des angeschlossenen Flutraums) transportiert werden. Die Strömungsgeschwindigkeit steigt dadurch stromab der angeschlossenen Fluträume sowohl bei Flut- als auch im Ebbestrom bei allen Maßnahmen (siehe Tabelle 6). Die Zunahmen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit liegen bei bis zu ca. 21 cm/s. Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit steigt stromab der Fluträume um bis zu ca. 17 cm/s. Die steigende Strömungsgeschwindigkeit stromab der Fluträume führt zu einer stärkeren Mobilisierung und somit zu einem höheren Transport von Sedimenten. Diesbezüglich ist vor allem das Verhältnis des Anstieges der Flut- zur Ebbestromgeschwindigkeit relevant. Bei fast allen untersuchten Varianten der betrachteten Maßnahmen übersteigt die Zunahme der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit die Zunahme der maximalen Flutstromgeschwindigkeit. Daraus resultiert eine Abnahme des F:E Verhältnisses. Nur lokal im Bereich des angeschlossenen Flutraums steigt das max. F:E Verhältnis an. Die maximalen Änderungen des max. F:E Verhältnisses sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Infolge der höheren Strömungsgeschwindigkeit wird stromab der Fluträume mehr suspendiertes Sediment transportiert. Durch die Abnahme des max. F:E Verhältnisses verschiebt sich der Netto-Schwebstofftransport stromab der Fluträume bei den meisten Varianten der untersuchten Maßnahmen nach stromab. Vor allem zwischen der Trübungszone (ca. Elbe-Km 675) und Hamburg sinkt dadurch der in Richtung stromauf gerichtete Sedimenttransport (um bis zu 1.700 t/Tide, Tabelle 7). Damit wird der Akkumulation von Sedimenten im Hamburger Raum entgegen gewirkt. Lokal (nahe dem Anschluss des Flutraums) steigt der Netto-Schwebstofftransport (bis zu 1.000 t/Tide).

Der Anschluss von Flutraum im Hamburger Raum beeinflusst den Salzgehalt in der Brackwasserzone der Elbe. Die Änderung des maximalen Salzgehalts (Tabelle 8) liegt nicht bei allen Maßnahmen oberhalb eines sinnvollen, messtechnisch auch zu erfassenden Schwellenwertes von 0,1. Stromab von Wedel (ca. Elbe-Km 645) nimmt die maximale Flutstromgeschwindigkeit bei allen Maßnahmen ab. Dadurch wird das Salz weniger weit in das Ästuар transportiert. Dies führt zu einer Abnahme des maximalen Salzgehalts etwa zwischen Elbe-Km 660 (Grauerort) und Elbe-Km 710 (Otterndorf). Die stärkste Abnahme des maximalen Salzgehalts (0,2) tritt bei den Maßnahmen Neuland (NL1) und Kiesteich (KT3) auf. In der Elbmündung (stromab Elbe-Km 710) steigt der maximale Salzgehalt leicht (bis zu 0,1).

Maßnahme	Variante	Kurzbezeichnung	zusätzliches Tidevolumen [Mio. m³]	maximale Änderung des mittleren Tidehochwassers [cm]	bei Elbe-Km	maximale Änderung des mittleren Tideniedrigwassers [cm]	bei Elbe-Km	maximale Änderung des mittleren Tidehubs [cm]	bei Elbe-Km
Kiesteich	1	KT1	2,0	-1	645-670	1	618	-2	655
	2	KT2	2,1	-1	630-670	2	618	-3	615-665
	3	KT3	7,3	-4	635	8	618	-10	618
	4	KT4	2,1	-1	630-670	1	618	-2	615-665
Neuland	1	NL1	7,8	-4	613-635	5	608	-8	610-630
	2	NL2	3,1	-2	630-645	2	608	-3	610-645
Neuland und Kiesteich	1	NLKT1	5,2	-2	635	3	608-615	-4	630
	2	NLKT2	5,2	-2	645	4	615	-5	640
Kreetsand	1	KS1	0,8	< 1	630	1	615	-1	615
Spadenlander Ausschlag	1	SP1	1,5	< 1	630-665	2	615	-2	615
	2	SP2	1,5	< 1	630-665	3	615	-3	615
Spadenlander Ausschlag und Kreetsand	1	SPKS1	2,3	1	630-665	3	615	-3	615
	2	SPKS2	2,3	1	630	4	615	-4	615
Alte Süderelbe	1	ASE1	4,9	-2	650	2	615-660	-4	650
	2	ASE2	5,3	-2	650	3	620-635	-4	620-650
	3	ASE3	3,5	-1	655	1	615-650	-3	650
	4	ASE4	5,3	-2	665	3	620-635	-4	620-665
	5	ASE5	5,3	-2	640-655	3	620-635	-4	645
	6	ASE6	5,3	-2	650	2	620-635	-4	620-660
Neue Alte Süderelbe	1	NASE1	8,6	-3	650-660	4	620-630	-6	615-660
	2	NASE2	9,3	-3	650-670	5	620-630	-7	615-650
	3	NASE3	9,2	-3	650-670	5	620-630	-7	615-630

Tabelle 5: Tabellarische Übersicht der maximalen Wirkung der Maßnahmen auf die Wasserstände. Änderungen in der Süderelbe werden nicht berücksichtigt.

Maßnahme	Variante	Kurzbezeichnung	zusätzliches Tidevolumen [Mio. m³]	Änderung der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (Mit) [cm/s]	bei Elbe-Km	Änderung der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit (Mit) [m/s]	bei Elbe-Km	Änderung max. Flutstrom : max. Ebbestrom (Mit) [-]	bei Elbe-Km
Kiesteich	1	KT1	2,0	-2,5 bis 5	615 und 618	bis 5	618	-0,06 bis 0,02	625 und 618
	2	KT2	2,1	-2,5 bis 10	615 und 618	bis 5	618	-0,04 bis 0,08	626 und 618
	3	KT3	7,3	-7,5 bis 15	615 und 618	-2,5 bis 17	615 und 618	-0,16 bis 0,07	625 und 618
	4	KT4	2,1	-2,5 bis 10	615 und 618	bis 5	618	-0,04 bis 0,08	626 und 618
Neuland	1	NL1	7,8	-12 bis 5	608	± 5	608 und 630	-0,1 bis 0,05	608 und 630
	2	NL2	3,1	-5 bis 2,5	608	± 2,5	608 und 630	± 0,05	608 und 630
Neuland / Kiesteich	1	NLKT1	5,2	-5 bis 10	608 und 618	bis 7	618	-0,06 bis 0,06	635 und 618
	2	NLKT2	5,2	-2,5 bis 13	618	bis 5	618	-0,06 bis -0,12	630 und 618
Kreetsand	1	KS1	0,8	-2,5 bis 5	615	-2,5 bis 7	615	-0,02 bis 0,04	615 und 618
Spadenlander Ausschlag	1	SP1	1,5	-5 bis 18	617	bis 5	617	-0,04 bis 0,15	630 und 615
	2	SP2	1,5	-6 bis 20	615	-8 bis 7	615	-0,02 bis 0,08	618
Spadenlander Ausschlag /	1	SPKS1	2,3	-5 bis 21	615	-5 bis 7	615	-0,04 bis 0,15	615
	2	SPKS2	2,3	-7 bis 15	615	-5 bis 10	615	-0,03 bis 0,11	630 und 618
Alte Süderelbe	1	ASE1	4,9	< ±2,5	628	bis 5	628	-0,04 bis 0	630
	2	ASE2	5,3	bis -3	635	bis 3	630 und 635	-0,03 bis 0	635
	3	ASE3	3,5	< ±2,5	628	bis 3	630	-0,03 bis 0	635
	4	ASE4	5,3	-3 bis 3	628 und 635	< ± 2,5	628 und 635	-0,03 bis 0	635
	5	ASE5	5,3	bis -3	618	bis 3	630 und 635	-0,02 bis 0,02	635 und 630
	6	ASE6	5,3	bis -3	635	bis 4	628	-0,06 bis 0,02	630 und 628
Neue Alte Süderelbe	1	NASE1	8,6	-5 bis 6	620 und 630	bis 7	630	-0,04 bis 0,04	635 und 625
	2	NASE2	9,3	-5 bis 6	620 und 635	-3 bis 5	625 und 635	-0,04 bis 0,04	620 und 625
	3	NASE3	9,2	-5 bis 3	620 und 635	bis 5	635	-0,04 bis 0,02	630 und 625

Tabelle 6: Tabellarische Übersicht der Wirkung der Maßnahmen auf die maximale Strömungsgeschwindigkeit. Änderungen in der Süderelbe sowie innerhalb der Maßnahmen werden nicht berücksichtigt.

Maßnahme	Variante	Kurzbezeichnung	zusätzliches Tidevolumen [Mio. m³]	maximale Abnahme des Netto-Schwebstofftransports [t/Tide]	bei Elbe-Km	maximale Zunahme des Netto-Schwebstofftransports [t/Tide]	bei Elbe-Km
Kiesteich	1	KT1	2,0	700	665	500	695
	2	KT2	2,1	1.000	665	500	675
	3	KT3	7,3	2.000	665	500	690
	4	KT4	2,1	600	665	500	675
Neuland	1	NL1	7,8	1.300	660	< 100	
	2	NL2	3,1	1.000	665	500	675
Neuland / Kiesteich	1	NLKT1	5,2	1.000	670	200	695
	2	NLKT2	5,2	1.500	675	400	700
Kreetsand	1	KS1	0,8	750	695	250	685
Spadenlander Ausschlag	1	SP1	1,5	300	675	< 100	615
	2	SP2	1,5	400	675	< 100	615
Spadenlander Ausschlag /	1	SPKS1	2,3	500	675	100	615
	2	SPKS2	2,3	500	675	100	615
Alte Süderelbe	1	ASE1	4,9	800	660 und 628	300	705
	2	ASE2	5,3	900	660 und 635	300	635
	3	ASE3	3,5	600	665	200	705
	4	ASE4	5,3	1.000	670	500	635
	5	ASE5	5,3	1.000	670	1.000	630
	6	ASE6	5,3	1.700	630	300	705
Neue Alte Süderelbe	1	NASE1	8,6	1.400	670	400	300
	2	NASE2	9,3	1.500	670	700	350
	3	NASE3	9,2	1.500	670	4.000	350

Tabelle 7: Tabellarische Übersicht der Wirkung der Maßnahmen auf den Netto-Schwebstofftransport. Änderungen in der Süderelbe sowie innerhalb der Maßnahmen werden nicht berücksichtigt.

Maßnahme	Variante	Kurzbezeichnung	zusätzliches Tidevolumen [Mio. m³]	maximale Änderung des Salzgehalts [-]	bei Elbe-Km
Kiesteich	1	KT1	2,0	< -0,1 0,1	- 695
	2	KT2	2,1	-0,1 < 0,1	695 -
	3	KT3	7,3	-0,2 < 0,1	695 -
	4	KT4	2,1	0,1	625
Neuland	1	NL1	7,8	-0,2 0,1	695 725
	2	NL2	3,1	-0,1 0,1	705 725
Neuland / Kiesteich	1	NLKT1	5,2	< ±0,1	-
	2	NLKT2	5,2	-0,2 0,1	695 735
Kreetsand	1	KS1	0,8	< ±0,1	-
Spadenlander Ausschlag	1	SP1	1,5		
	2	SP2	1,5		
Spadenlander Ausschlag /	1	SPKS1	2,3		
	2	SPKS2	2,3		
Alte Süderelbe	1	ASE1	4,9	< ±0,1	-
	2	ASE2	5,3		
	3	ASE3	3,5		
	4	ASE4	5,3		
	5	ASE5	5,3		
	6	ASE6	5,3		
Neue Alte Süderelbe	1	NASE1	8,6		
	2	NASE2	9,3		
	3	NASE3	9,2		

Tabelle 8: Tabellarische Übersicht der Wirkung der Maßnahmen auf den maximalen Salzgehalt in der Elbe. Änderungen in der Süderelbe sowie innerhalb der Maßnahmen werden nicht berücksichtigt.

6.6 Studie zur Wirkung der Maßnahme Neue Alte Süderelbe

In diesem Abschnitt wird die Wirkung der Maßnahme Neue Alte Süderelbe detailliert beschrieben, da sie in keinem Einzelbericht enthalten ist.

„Der Förderkreis »Rettet die Elbe« e.V. schlägt vor, die Alte Süderelbe weitgehend in ihrem alten Verlauf zu öffnen, ...“ Zitat [17]. In einer Studie werden, aufbauend auf dem in [17] gemachten Vorschlag, drei Varianten der Verbindung zwischen der Alten Süderelbe und der Süderelbe untersucht (Bild 8). Die Modelltopographie ist in Bild 8 dargestellt. Als Neue Alte Süderelbe werden in Anlehnung an die Formulierung des Förderkreises Rettet die Elbe e.V., die Wasserkörper der Alten Süderelbe (zwischen dem Köhlfleet und dem Mühlenberger Loch) und der Verbindung zwischen der Süderelbe und dem Köhlfleet bzw. der Alten Süderelbe bezeichnet. Bei der Variante NASE1 ist die Süderelbe an das Köhlfleet und die Alte Süderelbe angeschlossen. Bei der Variante NASE2 ist die Alte Süderelbe zusätzlich an das Mühlenberger Loch angeschlossen. Bei der Variante NASE3 ist die Süderelbe über die Alte Süderelbe mit dem Mühlenberger Loch verbunden. Eine direkte Verbindung zum Köhlfleet existiert nicht.

Wirkung auf die Wasserstände

In Bild 18 ist die Wirkung des Anschlusses der Neuen Alten Süderelbe auf die Wasserstände (Diagramm 1) auf dem Längsprofil durch die Elbe dargestellt. Das mittlere Tideniedrigwasser steigt durch den Anschluss der Neuen Alten Süderelbe in Hamburg um 4 cm bis 5 cm (gestrichelte Linie in Diagramm 1). Das mittlere Tidehochwasser sinkt. Der mittlere Tidehub nimmt um 6 cm bis 7 cm ab. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Im Vergleich zum beidseitigen Anschluss der Alten Süderelbe ohne Anbindung an die Süderelbe (Variante ASE4) wird die Wirkung auf das MThb, MTnw und MThw knapp verdoppelt. Dies entspricht in etwa dem Verhältnis des angeschlossenen Tidevolumens. Im Einzelnen tritt die folgende Wirkung auf.

NASE1: zweiseitiger Anschluss zum Köhlfleet

Bei dem zweiseitigen Anschluss der Neuen Alten Süderelbe an das Köhlfleet (NASE1) steigt das MTnw großräumig an (stromauf des Elbe-Km 720). In Hamburg ist der Anstieg des MTnw mit ca. 4 cm am größten. Das MThw sinkt stromauf von St. Margarethen (ca. Elbe-Km 690). Bei Stadersand (ca. Elbe-Km 655) tritt der maximale Rückgang des MThw (3 cm) auf. In Hamburg liegt die Abnahme des MThw bei 2 cm. Der mittlere Tidehub sinkt stromauf der Oste (ca. Elbe-Km 705). Die Tidehubabsenkung ist nicht so groß wie bei dem Anschluss des Flutraums an das Mühlenberger Loch (NASE2 und NASE3). In Hamburg (ca. Elbe-Km 615 bis Elbe-Km 630) beträgt die Tidehubreduktion ca. 6 cm und ist damit etwa 1 cm geringer als bei den anderen beiden Varianten.

NASE2: dreiseitiger Anschluss

Das MTnw steigt durch den dreiseitigen Anschluss der Neuen Alten Süderelbe stromauf des Elbe-Km 720 (Altenbruch). Die maximale Zunahme liegt im Hamburger Raum (bei ca. 5 cm).

Das MThw sinkt stromauf von St. Margarethen (ca. Elbe-Km 690). Bei Grauerort (Elbe-Km 660) tritt die größte Abnahme (3 cm) auf. Der mittlere Tidehub sinkt stromauf der Oste (ca. Elbe-Km 705). Die maximale Abnahme liegt mit 7 cm in Hamburg (ca. Elbe-Km 620).

NASE3: zweiseitiger Anschluss zum Mühlenberger Loch

Der zweiseitige Anschluss der Neuen Alten Süderelbe zum Mühlenberger Loch weist die größte Wirkung auf die Wasserstände in der Tideelbe auf. Stromauf des Elbe-Km 720 (Alt-enbruch) steigt das MTnw. Die maximale Zunahme liegt im Hamburger Raum (bei ca. 5 cm). Das MThw sinkt stromauf von St. Margarethen (ca. Elbe-Km 690). Bei Grauerort (Elbe-Km 660) tritt die größte Abnahme (3 cm) auf. Der mittlere Tidehub sinkt stromauf der Oste (ca. Elbe-Km 705). Die maximale Abnahme liegt mit 7 cm in Hamburg (ca. Elbe-Km 620). Die Unterschiede der Wirkung der Varianten NASE2 und NASE3 auf die Wasserstände sind marginal.

Wirkung auf die Strömungsgeschwindigkeit

Die Wirkung der Maßnahme Neue Alte Süderelbe auf die die maximale Flut- (Diagramm 2) und maximale Ebbestromgeschwindigkeit (Diagramm 3) sind in Bild 18 dargestellt. Die Wirkung auf das F:E- Verhältnis ist in Bild 19 (Diagramm 1) abgebildet. In Tabelle 6 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

NASE1: zweiseitiger Anschluss zum Köhlfleet

Stromauf des Köhlfeets (ca. Elbe-Km 630) sinkt die maximale Flutstromgeschwindigkeit durch den zweiseitigen Anschluss der Neuen Alten Süderelbe an das Köhlfleet um 5 cm/s (ca. Elbe-Km 620). Zwischen dem Köhlfleet und Stadersand (ca. Elbe-Km 655) steigt die maximale Flutstromgeschwindigkeit um bis zu 6 cm/s (Elbe-Km 630). Stromab von Stadersand nimmt die maximale Flutstromgeschwindigkeit ab. Die Abnahme liegt unterhalb des sinnvollen, messtechnisch noch zu erfassenden Schwellenwertes von 2,5 cm/s. Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit nimmt stromauf des Köhlfleet (Elbe-Km 630) und stromab der Stör (ca. Elbe-Km 680) ab. Stromauf des Köhlfleets beträgt die Abnahme ca. 3 cm/s (zwischen Elbe-Km 625 bis Elbe-Km 630), stromab des Stör liegt die Abnahme unterhalb des sinnvollen, messtechnisch noch zu erfassenden Schwellenwertes von 2,5 cm/s. Zwischen dem Köhlfleet und der Stör steigt die maximale Ebbestromgeschwindigkeit um bis zu 5 cm/s. Das maximale F:E Verhältnis sinkt stromauf der Stromspaltung bei Elbe-Km 626 sowie zwischen dem Köhlfleet (Elbe-Km 630) und der Elbmündung (Elbe-Km 720) um bis zu 0,04 (ca. Elbe-Km 630). Zwischen dem Köhlfleet und der Stromspaltung am Köhlbrand steigt das maximale F:E- Verhältnis um bis zu 0,04 (ca. Elbe-Km 626).

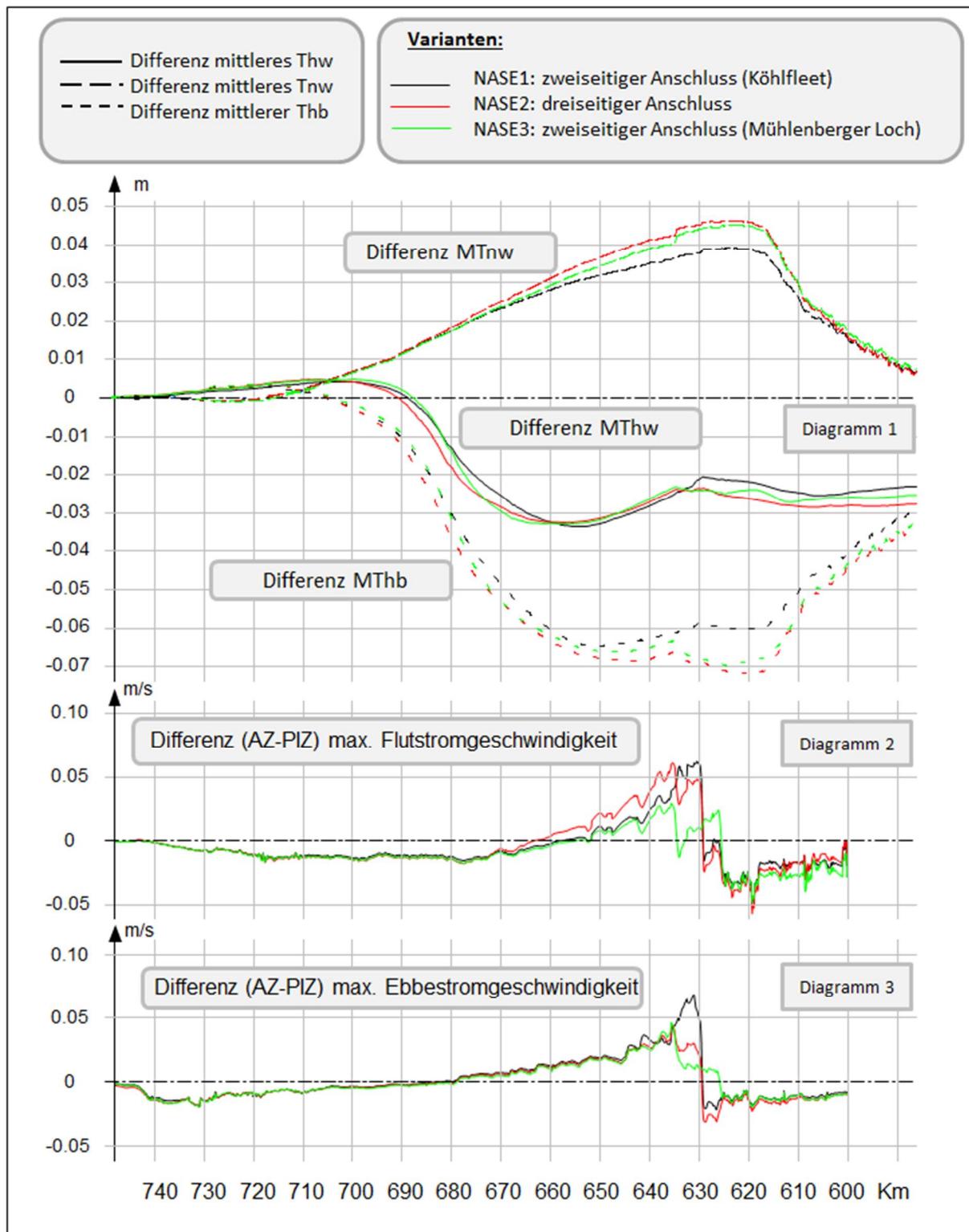


Bild 18: Wirkung der Maßnahme Neue Alte Süderelbe auf die Wasserstände und die maximale Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit auf dem Längsprofil durch die Elbe.

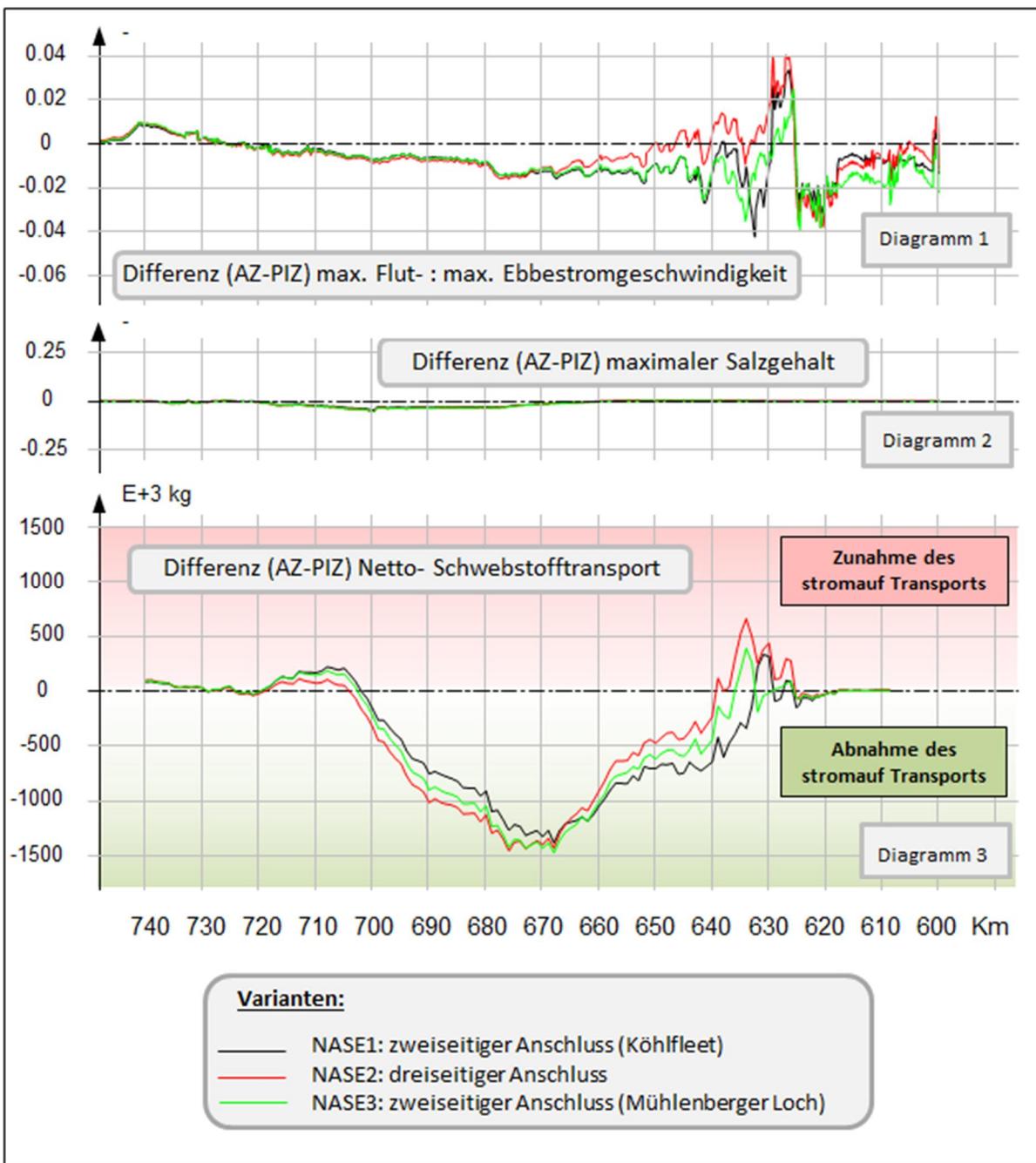


Bild 19: Wirkung der Maßnahme Neue Alte Süderelbe auf das maximale F:E Verhältnis, den maximalen Salzgehalt und den querschnittsintegrierten Netto- Schwebstofftransport auf dem Längsprofil durch die Elbe.

NASE2: dreiseitiger Anschluss

Beim dreiseitigen Anschluss der Neuen Alten Süderelbe sinkt die maximale Flutstromgeschwindigkeit stromauf des Köhlfleets (ca. Elbe-Km 630) bis zu 5 cm/s (Elbe-Km 620). Eine Abnahme der maximalen Flutstromgeschwindigkeit, die unterhalb des sinnvollen, messtechnisch noch zu erfassenden Schwellenwertes von 2,5 cm/s liegt, tritt stromab von Grauerort (ca. Elbe-Km 660) auf. Zwischen dem Köhlfleet und Grauerort steigt die maximale Flut-

stromgeschwindigkeit um bis zu 6 cm/s (ca. Elbe-Km 635). Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit nimmt stromauf des Köhlfleets (ca. Elbe-Km 630) und stromab der Stör (ca. Elbe-Km 680) ab. Mit 3 cm/s liegt die Abnahme der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit nur zwischen dem Köhlfleet (ca. Elbe-Km 630) und der Stromspaltung am Köhlbrand (ca. Elbe-Km 626) oberhalb des sinnvollen, messtechnisch noch zu erfassenden Schwellenwertes von 2,5 cm/s. Zwischen dem Köhlfleet und der Stör (ca. Elbe-Km 680) steigt die maximale Ebbestromgeschwindigkeit um bis zu 5 cm/s (ca. bei Elbe-Km 635). Das maximale F:E Verhältnis steigt zwischen dem Elbe-Km 626 und Elbe-Km 645 (Lühe) um bis zu 0,04 (bei Elbe-Km 626). Stromauf des Elbe-Km 626 sinkt das maximale F:E Verhältnis um bis zu 0,04 (ca. bei Elbe-Km 620). Stromauf von Lühe (ca. Elbe-Km 645) sinkt das maximale F:E Verhältnis. Die Abnahme liegt unter 0,02.

NASE3: zweiseitiger Anschluss zum Mühlenberger Loch

Die maximale Flutstromgeschwindigkeit steigt durch die Verbindung der Süderelbe über die Alte Süderelbe zum Mühlenberger Loch (NASE3) zwischen der Stromspaltung bei Elbe-Km 626 und Schwarztönnensand (ca. Elbe-Km 665) um bis zu 3 cm/s (ca. Elbe-Km 635). und Stromab von Elbe-Km 665 sinkt die maximale Flutstromgeschwindigkeit. Die Änderung ist kleiner als der messtechnisch noch zu erfassende Schwellenwert von 2,5 cm/s. Stromauf der Stromspaltung bei Elbe-Km 626 sinkt die maximale Flutstromgeschwindigkeit um bis zu 5 cm/s (bei Elbe-Km 620). Das maximale F:E- Verhältnis steigt zwischen dem Köhlfleet (ca. Elbe-Km 630) und der Stromspaltung am Köhlbrand (ca. Elbe-Km 626) um 0,02 und stromab der Kugelbake (ca. Elbe-Km 730) um 0,01. Im übrigen Ästuar sinkt das maximale F:E- Verhältnis um bis zu 0,04 (Elbe-Km 620 und Elbe-Km 635).

Maximale Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Maßnahme

Für die Beurteilung der Neue Alte Süderelbe unter dem Aspekt einer möglichen Verbesserung der Fischdurchgängigkeit sind auch die Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Maßnahme relevant. Die größten maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten sind in Tabelle 9 aufgelistet. Die Anschlussbereiche der Maßnahme sind nicht unter dem Gesichtspunkt möglicher Lockströmungen optimiert worden, so dass hierfür keine Werte angegeben werden.

	NASE1	NASE2	NASE3
max. Flutstromgeschwindigkeit	2,5	1,2	1,8
max. Ebbestromgeschwindigkeit	1,2	0,8	1,0

Tabelle 9: Größter Wert der maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit innerhalb der Maßnahme Neue Alte Süderelbe.

Wirkung auf den Salzgehalt

Der maximale Salzgehalt in der Elbe wird durch die Maßnahme Neue Alte Süderelbe zwischen dem Elbe-Km 660 und Elbe-Km 720 reduziert (Bild 19, Diagramm 2). Bei keiner Vari-

ante tritt eine Veränderung des maximalen Salzgehalts oberhalb eines sinnvollen, mess-technisch noch zu erfassenden Schwellenwertes von 0,1 auf.

Wirkung auf den Netto-Schwebstofftransport

Die Maßnahme Neue Alte Süderelbe beeinflusst den Netto- Schwebstofftransport in der Tideelbe. Durch alle drei Varianten wird der Netto- Schwebstofftransport großräumig reduziert. Nur im Hamburger Raum (ca. Elbe-Km 640 bis Elbe-Km 625) und stromab von Brunsbüttel steigt der Netto- Schwebstofftransport. Eine Abnahme des Netto-Schwebstofftransports bedeutet je nach Ausgangssituation eine Reduktion des stromauf gerichteten Schwebstofftransports oder eine Zunahme des stromab gerichteten Schwebstofftransports.

Beim dreiseitigen Anschluss der Neuen Alten Süderelbe (NASE2) ist der Anstieg des Netto-Schwebstofftransports in Hamburg knapp doppelt so groß wie bei den beiden anderen Varianten. Er erstreckt sich auf einen Abschnitt von ca. 15 Km, während ein Anstieg des Netto-Schwebstofftransport bei den Varianten NASE1 und NASE3 nur auf einem Abschnitt von je ca. 5 Km auftritt. Die Abnahme des Netto-Schwebstofftransports stromab von Hamburg ist bei allen Varianten gleich groß. Bei Elbe-Km 675 (Bereich der Trübungszone) nimmt der Netto-Schwebstofftransport gegenüber dem Planerischen Ist-Zustand bei allen Varianten um ca. 4% ab.

Fazit

Die Maßnahme Neuen Alten Süderelbe führt zu einer Tidehubreduktion und einer Reduktion des Netto- Schwebstofftransports. Von allen untersuchten Maßnahmen wird bei der Maßnahme Neuen Alten Süderelbe das größte Tidevolumen an die Tideelbe angeschlossen. Die Wirkung des Anschlusses der Alten Süderelbe wird durch den zusätzlichen Flutraum im Verbindungsstück zur Süderelbe verstärkt. Der zweiseitige Anschluss an das Köhlfleet (NASE1) dämpft die Wirkung auf die Wasserstände in der Tideelbe gegenüber den anderen beiden Varianten leicht. Gegenüber dem dreiseitigen Anschluss (NASE2) ist die Reduktion des F:E Verhältnisses beim zweiseitigen Anschluss zum Mühlenberger Loch ausgeprägter. Wenn die Maßnahme Neue Alte Süderelbe weiter betrachtet werden soll, ist auch die Wirkung in der Süderelbe zu untersuchen.

7 Bewertung

Alle untersuchten 7 Maßnahmen bzw. 22 Varianten zum Anschluss zusätzlichen Flutraums im Hamburger Raum sind geeignet das formulierte Ziel einer Tidehubreduktion in der Elbe und einer Abnahme des stromauf gerichteten Netto-Schwebstofftransports zu erreichen. Sowohl Maßnahmen in der Süder- und Norderelbe als auch stromab des Stromspaltungsgebiets verursachen die gewünschte Wirkung. Die Tidehubreduktion durch den zusätzlichen Flutraum wirkt sich in der Tideelbe bei allen Varianten über eine Strecke von mindestens 100 Flusskilometern aus. Die Abnahme des Tidehubs setzt sich jeweils aus einem Anstieg des Tideniedrigwassers und einer Abnahme des Tidehochwassers zusammen. Der größte Anstieg des Tideniedrigwassers tritt jeweils im Hamburger Raum auf. Dies ist der Bereich in dem das mittlere Tideniedrigwasser den niedrigsten Wert innerhalb der Tideelbe annimmt. Das Gefälle zwischen dem mittleren Tideniedrigwasser in der unteren Tideelbe und dem Hamburger Raum wird dadurch reduziert. Die Strömungsgeschwindigkeit steigt stromab der angeschlossenen Fluträume auf einer Strecke von bis zu 80 Km. Die maximale Flutstromgeschwindigkeit steigt um bis zu 0,2 m/s. Dies fördert die Mobilisierung und den Transport von Sedimenten. In Hamburg und stromab, je nach Variante bis Elbe-Km 680 steigt der advektive Schwebstofftransport daher. Trotz der Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit sinkt das Verhältnis aus maximaler Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit stromab des angeschlossenen Flutraums bei der überwiegenden Zahl der Varianten der untersuchten Maßnahmen. Dies führt trotz des höheren Sedimenttransports bei Flut- und Ebbestrom stromab der Maßnahmen zu einer Reduktion des Netto- Schwebstofftransports. Damit wird dem stromauf gerichteten Netto-Transport von Sedimenten im Abschnitt der Elbe zwischen der Trübungszone und Hamburg entgegen gewirkt. Im Hinblick auf die Akkumulation von Sedimenten im Hamburger Raum ist dies als besonders positiv zu werten. Innerhalb der Fluträume ist mit Eintrag von Sedimenten zu rechnen, da die Durchströmung der Flächen gering und die Stillwasserzeiten hoch sind.

Die Wirkung von zusätzlichem Flutraum auf die Hydrodynamik der Tideelbe ist hauptsächlich von drei Faktoren abhängig: Der Größe des Flutraums, der Lage des Flutraums und dem Fließquerschnitt insbesondere im Anschlussbereich der Maßnahmen. Der Anschluss von Flutraum im Hamburger Raum verursacht im Vergleich zum Anschluss in anderen Flussabschnitten der Tideelbe eine besonders große Wirkung. Zusätzlich tritt die Wirkung bei einem Anschluss im Hamburger Raum in den jeweils relevanten Bereichen auf. Neben der großräumigen Lage des Flutraumes spielt vor allem die Größe des angeschlossenen Tidevolumens eine zentrale Rolle. Je größer das Tidevolumen eines Flutraums ist, desto größer ist auch die Wirkung der Maßnahme. Dies gilt allerdings nur, solange der Fließquerschnitt im Anschlussbereich des Flutraums an die Elbe sowie innerhalb des Flutraums groß genug ist, um den Gradienten des Wasserstand zwischen dem angeschlossene Flutraum und der Elbe innerhalb einer Tide auszugleichen. Andernfalls wird der angeschlossene Flutraum nicht vollständig genutzt. Ein zu großer Fließquerschnitt im Anschlussbereich des Flutraums zur

Elbe kann die Strömungsverhältnisse (z.B. das F:E Verhältnis) im Sinne der Zielsetzung ungünstig beeinflussen. Daher ist der Anschluss eines Flutraums unter Berücksichtigung der jeweiligen Gegebenheiten in jedem Einzelfall festzulegen. Die Energiedissipation im Bereich der Fluträume, z.B. infolge des Fließweges oder der Sohlrauheit innerhalb eines Flutraumes spielt gegenüber den drei Faktoren Größe, Lage und Anschluss situation des Flutraums nur eine untergeordnete Rolle, bzw. ihr Einfluss ist lokal begrenzt.

Die Wirkung eines Flutraums auf die Wasserstände ist u.a. auch von der herrschenden Oberwassersituation abhängig. Mit steigendem Oberwasser steigt auch die Wirkung eines Flutraums auf die Wasserstände in der Tideelbe. Für die Untersuchungen wird ein über mehrere Wochen konstantes Oberwasser von 350 m³/s (langjährig häufigster Abfluss) angenommen. Dabei handelt es sich um den langjährig häufigsten Abfluss.

Beim gleichzeitigen Anschluss verschiedener Fluträume treten keine grundlegend anderen Systemreaktionen auf. Auch die Kombination von verschiedenen Maßnahmen ist daher geeignet, den Tidehub zu reduzieren und den stromauf gerichteten Netto-Schwebstofftransports zu verringern. Die Wirkung mehrerer gleichzeitig angeschlossener Fluträume ist immer kleiner als die Summe der Wirkungen der Einzelmaßnahmen, da sich gegenläufige Wirkungen vereinzelt aufheben können. Die Kombination von Maßnahmen ist dementsprechend ein geeignetes Mittel, um die zu erzielende Wirkung auf die Hydrodynamik und den Sedimenttransort zu vergrößern.

Die Regelung des Ein- und Ausströmens des Wassers in/aus dem Flutraum durch gesteuerte Wehre erhöht die Wirkung des angeschlossenen Tidevolumens nicht signifikant. Sinnvoll kann eine Wehrsteuerung aber zur Optimierung des Sedimentmanagements innerhalb einer Maßnahme oder in deren Nahbereich (z.B. durch eine Spülwirkung) sein.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, Oktober 2014

Im Auftrag

gez. Winkel

Dr. rer. Nat. N. Winkel
(Regierungsdirektor)

Bearbeiter

gez. Klöpper

Dipl.-Ing. M. Klöpper
(Wiss. Angestellter)

Literatur

- [1] Hans Peter Dücker, Heinz Glindemann, Hans-Heinrich Witte, Karsten Thode, *Konzept für eine nachhaltige Entwicklung der Tideelbe als Lebensader der Metropolregion Hamburg: Ein Diskussionsbeitrag der Hamburg Port Authority und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes 2006*.
- [2] Bundesanstalt für Wasserbau, *Potentialanalyse für die Unter- und Außenelbe: Systemanalysen zur hydraulischen Kompensation nachteiliger Entwicklungen der kennzeichnenden Tidewasserstände*, Hamburg 2003.
- [3] Bundesanstalt für Wasserbau, *Mittel- und langfristiges Strombaukonzept für die Tideelbe: Systemstudie zur Auswirkung der Schaffung von Flutraum im Bereich der "Alten Süderelbe"*, Hamburg 2007.
- [4] Bundesanstalt für Wasserbau, *Mittel- und langfristiges Strombaukonzept für die Tideelbe: Auswirkung der Schaffung von Fluträumen im Bereich der "Doveelbe"*, Hamburg 2007.
- [5] Bundesanstalt für Wasserbau, *Untersuchung des Strombaus und des Sedimentmanagements im Rahmen des "Tideelbekonzeptes": Bericht zum Bearbeitungskonzept*, Hamburg 2011.
- [6] Bruce B. Parker (Ed.), *Tidal Hydrodynamics*, John Wiley Sons, Inc., Rockville Maryland 1991.
- [7] Marcus Boehlich, *Tidedynamik in der Elbe*, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 2003.
- [8] Günter Lang, *Ein Beitrag zur Tidedynamik der Innenjade und des Jadebusens*, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 2003.
- [9] A. Malcherek, F. Piechotta, D. Knoch, *Technical Report Mathematical Module SediMorph Validation Document: Version 1.1*, Hamburg 2005.
- [10] Bundesanstalt für Wasserbau, *Analyse der Berechnungsergebnisse*,
http://www.baw.de/methoden/index.php5/Analyse_der_Berechnungsergebnisse
26.08.2014 um 12:03 Uhr.
- [11] V. Casulli, G. Lang, *Technical Report Mathematical Model UnTRIM Validation Document: Version June 2004 (1.0)*, Trento Hamburg 2004.
- [12] Bundesanstalt für Wasserbau, *Validierung des Basismodells "Elbe-Ästuar" für das Verfahren UnTRIM2007-SediMorphTideelbekonzeptes: Topographie 2010*, Hamburg 2014.
- [13] Morten Klöpper, *Untersuchung zur Wirkung von Flutraumvergrößerungen im Rahmen des Tideelbe-Konzeptes: Ein Werkstattbericht zur Untersuchung unterschiedlicher Maßnahmen im Hamburger Raum und ihre Wirkung auf die Tidedynamik*, BAW Kolloquium, Hamburg 2010.
- [14] Bundesanstalt für Wasserbau, *Untersuchung des Strombaus und des Sedimentmanagements im Rahmen des Tideelbekonzeptes: Bericht zur Wirkung der Maßnahmen im Bereich Spadenland*, Hamburg 2012.

- [15] Freie und Hansestadt Hamburg, Hamburg Port Authority AöR, *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch 2010: Elbegebiet, Teil III*, Hamburg **2013**.
- [16] Bundesanstalt für Wasserbau, *Untersuchung des Strombaus und des Sedimentmanagements im Rahmen des Tideelbekonzepts: Bericht zur Wirkung der Maßnahme Alte Süderelbe*, Hamburg **2014**.
- [17] Rettet die Elbe e.V., *Vortrag zum Workshop “Sauerstoffhaushalt der Tideelbe”*, Hamburg **2008**.